

LA ESCUELA DEL RADIOTÉCNICO

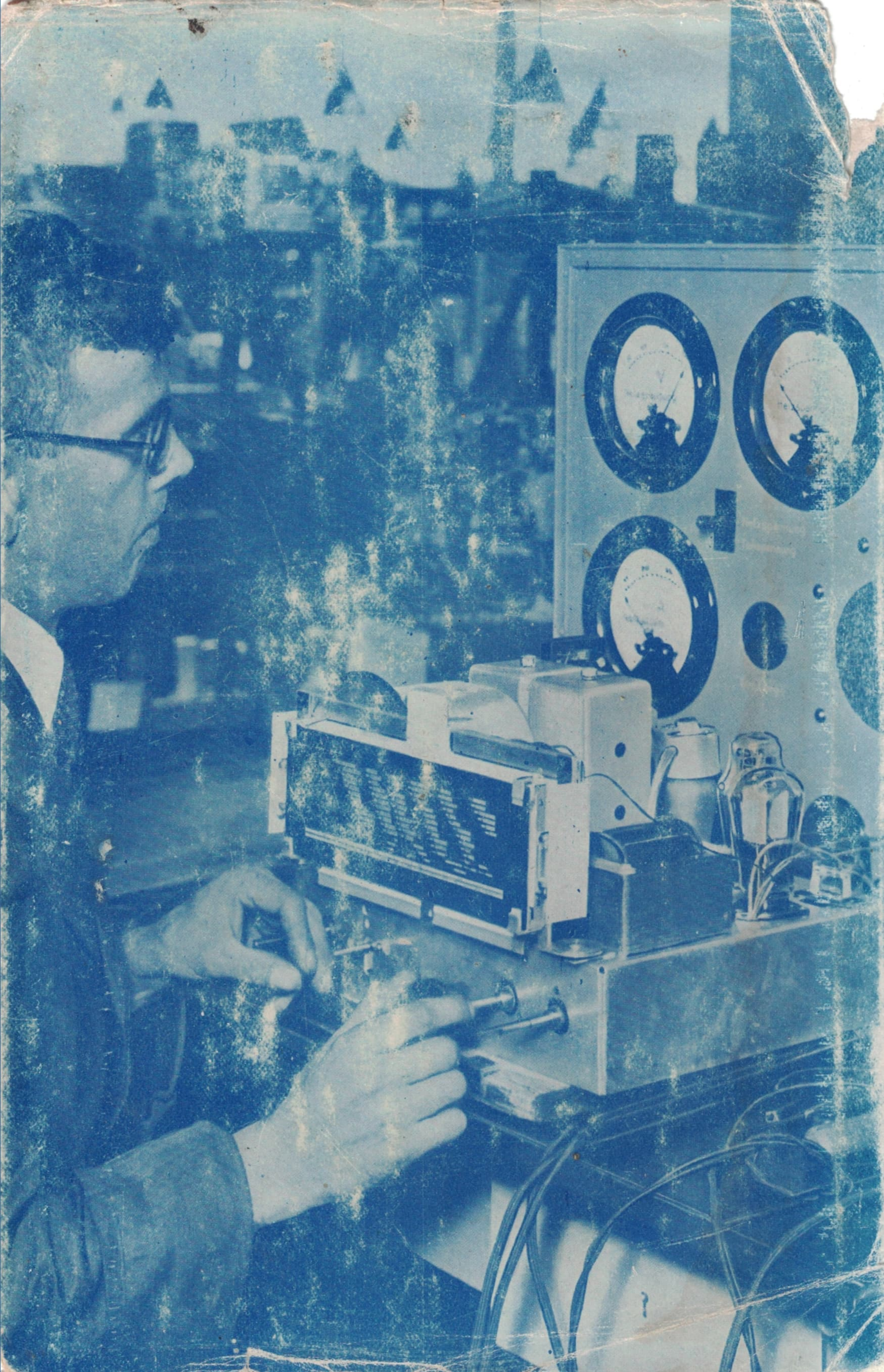


III

MEGAFONÍA Y ELECTROACÚSTICA

EDITORIAL LABOR, S.A.


LA ESCUELA DEL RADIOTÉCNICO
III
MEGAFONÍA Y ELECTROACÚSTICA
LA ESCUE
RADIOTÉC
III
MEGAFON
ELECTROACU
EDITORIAL LABO



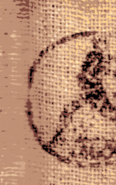
LA ESCUELA DEL RADIOTÉCNICO

EDITORIAL LABOR, S. A.
BARCELONA - MADRID

LA ESCUELA DEL RADIO-TECNICO

III

MEGAFONÍA Y ELECTRO-ACÚSTICA



LA E

RADI

EDITORIA
BARCEL



1.200
4 Vols

LA ESCUELA
DEL
RADIOTÉCNICO

TOMO III

Megafonía y Electroacústica

LA ESCUELA DEL RADIOTÉCNICO

ENCICLOPEDIA PRÁCTICA DE RADIOTECNIA APLICADA

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN

DE

JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS

Ingeniero de Telecomunicación

TOMO III



EDITORIAL LABOR, S. A.

BARCELONA - MADRID - BUENOS AIRES - RIO DE JANEIRO

1949

MEGAFONÍA
Y
ELECTROACÚSTICA

POR

JUAN JOSÉ RAMIL MORAL
Ingeniero de Telecomunicación

Con 197 figuras



EDITORIAL LABOR, S. A.
BARCELONA - MADRID - BUENOS AIRES - RIO DE JANEIRO
1949

PRINTED IN SPAIN

TALLERES GRÁFICOS MARIANO GALVE. CARMEN, 16 - BARCELONA

PRÓLOGO

La Electroacústica constituye una especialidad sumamente interesante, cuyas aplicaciones son cada día más numerosas, abarcando campos muy extensos.

Como todos los temas de gran especialización, para su aplicación y dominio es preciso poseer conocimientos muy diversos, que únicamente pueden conseguirse recurriendo a estudios detallados de disciplinas que a veces no parecen tener conexión entre ellas.

Las publicaciones y revistas que tratan de estas materias explican temas muy concretos y distintos entre sí, siendo necesario haber cursado antes, de una forma racional, una teoría general, para que se puedan aprovechar las posteriores lecturas de las publicaciones técnicas.

Siempre observé en la literatura técnica de lengua española una falta de textos dedicados a tan interesante tema como el que ahora consideramos. Generalmente, en los tratados de Radiotecnia o de Cine Sonoro, se dedican dos o tres capítulos a micrófonos, altavoces y amplificadores, creyéndose que con esa breve enunciación se pueden recoger algunos frutos. Esas exposiciones, puramente informativas, no pueden llenar las aspiraciones de conocimiento que tienen muchos técnicos, los cuales por sus trabajos en laboratorios, estudios de cine y de radiofusión, etc., se enfrentan constantemente con problemas de muy diversa índole.

Las consideraciones anteriores justifican mi trabajo.

He pretendido exponer en forma clara y sin grandes complicaciones matemáticas una teoría general que proporcione las herramientas precisas para considerar las aplicaciones prácticas más corrientes.

Se ha dividido la obra en tres partes: en la primera, se empieza por estudiar la Acústica, llegándose a fórmulas concretas, muy necesarias en los problemas de propagación y de energía acústica. A continuación se pasa revista a las teorías de sistemas mecánicoeléctricos y mecánicoacústicos que nos conducen a los capítulos de micrófonos y altavoces.

En la segunda parte se exponen los procedimientos de registro de sonido, para lo cual hemos creído necesario incluir una breve intro-

ducción, en la que estudiamos someramente fotoelectricidad, que nos sirve de base al capítulo de registro fotoacústico. También en esta parte se consideran los procedimientos de registro mecánicos o gramofónicos y el magnético, hoy tan utilizados en ciertas aplicaciones.

La tercera parte se dedica a Acústica Arquitectural o acústica de locales. Se empieza por considerar las características físicas, fisiológicas del sonido, tratando a continuación y en capítulos sucesivos sobre los temas relacionados con esta cuestión.

Hemos incluído capítulos sobre temas tan sugestivos como el dedicado a infra e hipersonidos, considerando también otros clásicos como el de estudio de la reverberación, con la amplitud necesaria para resolver todas las cuestiones posibles.

Como apéndice se ha incluído una colección de ejercicios cuya resolución metódica puede servir de base a otros muchos análogos. Consideramos del mayor interés estudiar detenidamente cada problema ya que de esa forma se pondrán de manifiesto las dudas y dificultades que toda teoría entraña.

Esta obra no está dedicada a un núcleo de público en particular; hemos intentado escribirla para que sirva de base de estudio a los nuevos técnicos y a los ya iniciados indistintamente.

Aunque todos los conceptos se han tratado con rigurosidad matemática, no hemos querido incluir cálculos demasiado complicados esperando que los que existen no signifiquen grandes dificultades.

Quiero expresar mi reconocimiento al ingeniero profesor de la Escuela de Ingenieros de Telecomunicación señor Riaza Rubio, a cuya colección particular de problemas pertenecen muchos de los ejercicios incluídos en esta obra, y al señor Fernández Huerta profesor de esta asignatura en la misma Escuela, el cual me ha ayudado en la corrección de las pruebas.

Juan José Ramil Moral

Madrid, agosto de 1948.

Índice de materias

TABLA DE SÍMBOLOS

La página indicada a la derecha de cada concepto es aquella donde se define el significado de la letra o donde se emplea por primera vez

		Págs.
A	Amplitud	83
A	Atenuación previa	190
A_F	Atenuación final	190
A_T	Atenuación total	190
A_1, A_2	Amplitudes de vibración táctil	140
a	Amplitud de vibración de una esfera	26
a	Semidistancia entre dos focos vibrantes	29
a	Distancia entre dos radiadores de una red	30
a	Amplitud eficaz del movimiento vibratorio de un disco	36
a	Elongación máxima de la membrana de un micrófono	40
a	Dimensión de una cinta.	50
a	Dimensión de un cristal según el eje óptico	51
a	Amplitud de la velocidad de vibración a la distancia r del diafragma	74
a	Semianchura de la banda de impresión luminosa.	104
a	Desplazamiento del pistón	203
a_0	Desplazamiento del pistón ficticio en el cuello de una bocina	74
a_1	Desplazamiento del diafragma	74
B	Diferencia del nivel acústico en belios	133
b	Dimensión de una cinta.	50
b	Dimensión de un cristal según el eje piezoeléctrico	51
C	Calor específico a presión constante	8
C	Capacidad	15
C	Constante de la emulsión.	108
C	Capacidad calorífica	204
C_A	Capacidad acústica	21
C_n	Constante del negativo.	108
C_p	Constante del positivo.	108
C_p	Calor específico del gas a presión constante	203
C_s	Capacidad eléctrica equivalente a S_0	70
C_1	Constante de la onda progresiva	11
C_1	Capacidad eléctrica equivalente a una cavidad de aire	48
C'_1	Capacidad eléctrica equivalente	20
C_2	Constante de la onda regresiva	11
c	Calor específico a volumen constante	8
c	Dimensión de un cristal según el eje eléctrico.	51
D	Coeficiente de dispersión no lineal	2
D	Diámetro de un pistón vibrante	34
D	Diámetro de una espira.	64
d	Densidad de un flúido en movimiento	7

		Págs.
d	Distancia del diafragma a la rejilla	204
d	Diámetro del disco de Rayleigh	205
d_0	Densidad de un flúido en reposo	6
E	Señal resultante, amplitud	2
E	Amplitud de la f. e. m.	15
E	Tensión continua en los bornes de un condensador	45
E	Intensidad del campo electrostático	97
E	Exposición	108
E	Estímulo	133
E	Componente alterna de la tensión	204
E_{eff}	F. e. m. eficaz	15
E_n	Exposición del negativo.	108
E_0	Componente constante de la serie de Fourier	2
E_0	Punto de inercia de la emulsión	108
E_0	Componente continua de la tensión	204
E_p	Exposición del positivo.	108
E_1	Valor particular de E	100
E_1, E_2	Amplitudes de los armónicos reducidos a una simple forma senoidal o cosenoidal	6
E'_1, E'_2	Amplitudes de los armónicos subindicados (términos en sen)	2
E''_1, E''_2	Amplitudes de los armónicos subindicados (términos en cos)	2
e	Señal resultante, valor instantáneo	2
e	Valor instantáneo de la f. e. m.	15
e	Base de los logaritmos neperianos	28
e	Distancia entre las armaduras de un condensador	45
e	Deformación de un cristal según el eje eléctrico.	51
e	Carga del electrón	100
e_B	Elongación en un punto B	12
e_n	Ennegrecimiento	107
e_t	Separación instantánea entre las placas	45
e'	Señal en un segundo instante	10
e'	Deformación de un cristal según el eje piezoeléctrico	51
F	Fuerza vibromotriz	16
F	Fuerza del foco	26
F	Valor máximo de la fuerza sobre una membrana	41
F	Fuerza magnetomotriz...	60
F	Valor máximo del flujo luminoso	103
F	Par que experimenta el disco de Rayleigh	205
F	Fuerza sobre la bobina de un altavoz de bobina móvil	211
F_{eff}	Valor eficaz de la fuerza oscilante	16
f	Frecuencia	2
f	Fuerza instantánea	18
f	Fuerza vibromotriz aplicada a la bobina de un altavoz	70
f_c	Frecuencia de corte de una bocina	37
f_h	Frecuencia umbral de salida	100
f_M	Componente moduladora de la fuerza	63
f_r	Frecuencia mecánica de resonancia	17
f_x, f_y, f_z	Componentes cartesianos de una fuerza	6
f_1	Frecuencia de la onda progresiva	11
f_2	Frecuencia de la onda regresiva	11
f'	Incremento variable de fuerza	60
f'	Esfuerzo constante entre las placas de un condensador debido a la tensión V de polarización	61

		Págs.
g	Espesor del aire en el entrehierro	117
H	Intensidad de campo magnético	48
H_1	Función de Struve	64
h	Distancia del cuello al vértice ideal de una bocina	36
h	Ancho del trazo luminoso	105
h	Altura de una sala	172
I	Densidad de energía	9
I	Corriente máxima	15
I	Intensidad de iluminación	108
I_{eff}	Corriente eficaz	15
I_i	Densidad de energía incidente	14
I_m	Densidad media de energía	11
$I_{máx}$	Valor máximo de la densidad de energía acústica	11
I_r	Densidad de energía reflejada	14
I_Ω	Energía en un volumen	9
I_o	Corriente constante de un micrófono en reposo	41
I_0	Componente continua de la corriente	204
I_1	Componente alterna de la corriente	204
i	Valor instantáneo de la intensidad de corriente	15
i	Inercia acústica	21
i_a	Intensidad en un puente de un micrófono en push-pull	43
i_b	Intensidad en otro puente de un micrófono en push-pull	43
i_r	Intensidad resultante de un micrófono en push-pull	43
J	Constante de la célula de Kerr	97
J_1	Función de Bessel	33
j	Operador imaginario	28
K	Coeficiente de energía reflejada	14
K	Constante dieléctrica	45
K	Constante piezoeléctrica	51
K	Constante de Planck	100

		Págs
K	Constante del oscilógrafo	104
K	Conductibilidad térmica del gas	203
k	Constante entera	13
k	Coeficiente de elasticidad	16
k	Coeficiente de variación de resistencia con la elongación	40
k	Elasticidad debida a una cavidad de aire	48
L_1	Inductancia eléctrica equivalente a una cavidad de aire	48
L'_1	Inductancia eléctrica equivalente	20
l	Distancia del foco a la pared reflectante	12
l	Longitud total de una red de radiadores en línea recta	31
l	Longitud de una bobina. Longitud de un circuito magnético	48 60
l	Elongación del trazo luminoso	104
M	Constante geométrica de la rejilla	204
m	Masa	6
m	Exponente	35
m	Amplitud de la vibración de un micrófono de condensador	45
m	Constante ≈ 0,6	68
m	Masa del electrón	100
m_d	Masa aparente por resistencia de radiación	27
m_i	Incremento de masa	64
m_T	Masa total	7
m_x, m_y, m_z	Masa entrante según la dirección de los ejes x, y, z	6
m'_x, m'_y, m'_z	Masa saliente según la dirección de los ejes x, y, z	6
m_1	Masa aparente debida a una cavidad de aire	48
N	Número de espiras	60
N	Diferencia de nivel acústico en nepers	133
N	Número de ejecutantes	172

		Págs.
N	Número de asientos	194
N_{dB}	Atenuación	186
$N_{\text{mín}}$	Atenuación mínima	187
N_S	Nivel de sensación táctil.	140
n	Orden general de un armónico	2
n	Volumen de corriente...	21
n	Número de radiadores alineados rectilíneamente.	31
n	Número de revoluciones por segundo	87
n	Número de canales	190
n_x, n_y	Índices de refracción....	97
O	Opacidad	107
P	Presión de un flúido en movimiento	6
P	Afinidad electrónica	100
P	Presión instantánea	203
P_{eff}	Valor eficaz de una presión alterna	48
P_θ	Presión acústica en la dirección dada por el ángulo θ	31
P_o	Presión de un flúido en reposo	8
P_o	Valor máximo de la presión	11
P_o	Presión acústica máxima.	54
P_o	Presión normal	203
P_1, P_2	Presiones a uno y otro lado de una cinta	50
q	Carga instantánea	15
q_o	Carga de un condensador en reposo	46
R	Resistencia	15
R	Radio de una esfera	26
R	Radio del disco de una bocina	36
R	Radio de un surco	87
R	Intensidad máxima, en el tiempo, de un vector senoidal giratorio	97
R_D	Resistencia dinámica....	22
R_E	Resistencia óhmica de un altavoz	61
R_i	Radio instantáneo de una esfera vibrante	26
R_θ	Relación de presiones para la dirección dada por el ángulo θ	31
R_o	Resistencia de un altavoz	68
R_1	Resistencia eléctrica equivalente	20
R_1	Resistencia eléctrica equivalente a una velocidad de aire	48
R_1	Reluctancia de un circuito magnético constante	60
R_2	Reluctancia de un circuito magnético variable.	60
r	Radio en coordenadas esféricas	11
r	Coeficiente de rozamiento	16
r	Distancia al foco vibrante	26
r	Componente resistiva de la impedancia mecánica de una esfera pulsante.	28
r	Resistencia instantánea de un micrófono	40
r	Resistencia debida al aire, por unidad de superficie	73
r	Intensidad instantánea de un vector senoidal giratorio	97
r	Constante	117
r	Respuesta de un altavoz.	206
r_A	Resistencia acústica de un altavoz	72
r_a	Resistencia acústica	21
r_b	Resistencia exterior al micrófono	40
r_d	Resistencia de radiación.	27
r_e	Vector eléctrico	99
r_R	Resistencia mecánica de radiación	64
r_x, r_y	Proyecciones sobre los ejes x e y del valor instantáneo de un vector giratorio	97
r'_x, r'_y	Expresión de los vectores r_x y r_y poniendo de manifiesto su desfase respectivo en el tiempo...	97
r_o	Resistencia del micrófono en reposo	40

		Págs.
r_0	Resistencia mecánica de un altavoz	70
r_1	Resistencia mecánica debida a una cavidad de aire	48
r_2	Componente resistiva de la impedancia mecánica de un pistón pulsante	28
S	Amplitud de una señal	2
S	Superficie	9
S	Coeficiente de conversión electromecánico	17
S	Superficie de un pistón vibrante	31
S	Sección de una bocina	34
S	Superficie de un condensador	45
S	Sección del núcleo	59
S	Sensibilidad de la célula	103
S	Sensación	133
S	Superficie de una sala	194
S	Superficie del pistón	203
S	Área de una cara de las cintas del termófono	204
S_p	Superficie de la membrana microfónica	41
S_0	Sección del cuello de una bocina	35
S_0	Elasticidad de un altavoz	70
S_1	Superficie del diafragma	74
S'	Superficie metálica de las paredes	203
s	Intensidad instantánea de una señal	2
T	Transparencia	107
T_n	Transparencia del negativo	108
T_p	Transparencia del positivo	108
T_0	Temperatura absoluta	204
t	Tiempo	2
t	Temperatura	9
t'	Tiempo en un segundo instante	10
U	Velocidad máxima de un punto de la superficie de una esfera vibrante	26
u	Componente de la velocidad según un eje x	6
u	Velocidad instantánea de un punto de la superficie en una esfera vibrante	26
u_0	Velocidad media de desplazamiento del pistón ficticio en el cuello de una bocina	74
u_1	Velocidad media de desplazamiento del diafragma	74
V	Volumen	9
V	Velocidad máxima	16
V	Diferencia de potencial instantánea	46
V	Potencial aplicado a un cristal	51
V	Tensión constante de polarización de un condensador	61
$\dot{V}$	Velocidad media de desplazamiento de la película	106
V	Volumen de una sala	174
V	Volumen de la cámara del termófono	204
V	Velocidad del flúido	205
V_{eff}	Valor eficaz de la velocidad oscilante	16
V_r	Velocidad máxima de resonancia	17
V_0	Volumen normal	203
V_1	Tensión máxima de señal aplicada a un altavoz	63
v	Componente de la velocidad según un eje y	6
v	Velocidad instantánea	16
v	Velocidad de desplazamiento de un conductor	48
v	Velocidad de salida del electrón	100
v	Velocidad de desplazamiento de la cinta magnetofónica	117
v_h	Velocidad umbral	100
v_i	Tensión instantánea de señal aplicada a un altavoz	63
$v_{lím}$	Velocidad límite de salida del electrón	100
v_p	Velocidad de propagación de la onda de una bocina	37
v_0	Velocidad de propagación en el aire normal	8

		Págs.
v_1	Velocidad de propagación	8
W	Potencia consumida total	20
W	Energía media radiada en un período	30
W	Energía del quantum	100
W	Potencia acústica aparente tomada por el altavoz	206
W_a	Potencia acústica	21
W_c	Densidad de energía cinética	9
W_D	Nivel cero de energía acústica	135
W_P	Densidad de energía de presión	9
W'	Potencia consumida por el sistema mecánico	20
W'	Energía debida al rayo directo	177
w	Componente de la velocidad según un eje Z	6
X_D	Reactancia de radiación.	64
x	Distancia	10
x	Coordenada cartesiana	11
x	Elongación	16
x	Distancia al centro de una esfera vibrante	27
x	Componente reactiva de la impedancia mecánica de una esfera pulsante.	28
x	Distancia axial al cuello de una bocina	35
x	Elongación instantánea de la membrana de un micrófono	40
x_a	Reactancia acústica	21
x'	Volumen de desplazamiento	21
x'	Componente reactiva de la impedancia mecánica de un pistón pulsante.	28
Y	Potencial de velocidad.	7
Y_r	Potencial de velocidad total debido a dos puntos	29
Y_1	Potencial de velocidad debido al punto 1	29
Y_1	Función de Bessel	33
Y_2	Potencial de velocidad debido al punto 2	29
y	Coordenada cartesiana	11

		Págs.
Z	Impedancia	15
Z_a	Impedancia acústica	17
Z_D	Impedancia dinámica	19
Z_E	Impedancia eléctrica	61
Z_{EM}	Impedancia electromecánica	61
Z_M	Impedancia mecánica	17
Z_T	Impedancia total de un altavoz	19
Z_0	Impedancia acústica para el cuello de la bocina.	74
Z_0	Impedancia característica del atenuador	190
Z_1	Impedancia acústica para el diafragma de un altavoz	74
Z'_D	Impedancia dinamoeléctrica	19
Z'_T	Impedancia del circuito eléctrico equivalente	20
z	Coordenada cartesiana	11
α	Coeficiente de absorción.	14
α	Ángulo de «tracking»	84
α	Parámetro	203
γ	Relación entre los calores específicos a p. c. y a v. c.	8
γ	Gamma de la emulsión.	108
γ_n	Gamma del negativo	108
γ_p	Gamma del positivo	108
ϱ_0	Densidad	160
η	Rendimiento de un altavoz	64
η_a	Coeficiente de reverberación aparente	177
η_v	Coeficiente de reverberación	177
θ	Coordenada angular esférica	11
θ	Ángulo	29
θ	Ángulo entre la normal al disco y la velocidad del flúido	205
λ	Longitud de onda	28
σ	Condensación	7
Φ	Flujo de energía por unidad de superficie	10
Φ	Flujo magnético	48
Φ	Función trabajo	100
Φ	Flujo luminoso correspondiente al rectángulo explorador	104

		Págs.
Φ_a	Flujo que atraviesa la película	107
Φ_e	Flujo luminoso	99
Φ_i	Flujo incidente luminoso instantáneo	107
Φ_m	Flujo medio de energía por unidad de superficie	11
$\Phi_{mín}$	Función trabajo para el electrón superficial	100
Φ_1	Flujo magnético a través de la armadura de reposo	59
Φ_2	Flujo instantáneo debido a la corriente de un altavoz	59
Φ'	Flujo luminoso en el intervalo de avance h	106
φ	Ángulo de fase de la señal	2
φ	Coordenada angular esférica	11
φ	Ángulo acimutal	176
φ_D	Ángulo acimutal del foco respecto al micrófono	177
Ψ	Ángulo de fase de la señal resultante	2
Ψ	Ángulo del rayo que deja pasar el analizador, con el eje del campo eléctrico	99
Ψ	Ángulo cenital	176
Ψ_D	Ángulo cenital del foco respecto al micrófono	177
Ω	Pulsación mecánica	16
Ω_r	Pulsación mecánica de resonancia	17
ω	Pulsación	2
ω_c	Pulsación de corte	68
ω_r	Pulsación de resonancia mecánica	41

Introducción

La acústica tiene tal importancia en la actualidad, que su estudio no puede limitarse a observar de paso algunas de sus modalidades, sino que se debe realizar una extensa visión de conjunto y después analizar detalladamente cada uno de los aspectos de la cuestión. Cada uno de estos aspectos puede constituir un verdadero tratado independiente.

La ciencia del sonido se encuentra en todas las manifestaciones de la vida ordinaria: cuando se quiere transmitir, reproducir o registrar la música o la palabra, cuando se analizan ruidos, sonidos o vibraciones, al proyectar locales donde se desea producir perturbaciones acústicas para que sean percibidas por un auditorio con inteligibilidad, etc.

Es preciso entonces considerar:

1.° Principios físicos teóricos.
2.° Electroacústica.
3.° Acústica musical fisiológica y psicológica.
4.° Aplicación de la acústica a la arquitectura.
5.° Acústica de las vibraciones y ultrasonidos.

Cada una de estas ramas debía estudiarse totalmente hasta agotar el tema; sin embargo, en esta exposición sólo podemos tratar todas las materias con la suficiente amplitud para dar una idea de conjunto.

Como decíamos anteriormente, no es preciso insistir mucho para comprender la gran importancia que hoy tienen todos los procedimientos de difusión sonora: la radiodifusión, el cinematógrafo, los programas de música para multitudes, las instalaciones auxiliares en todo acto público son posibles merced a la utilización de los dispositivos que denominaremos «sistemas sonoros».

La electroacústica permite el estudio de los fenómenos físicos que realizan el ciclo de transformación que siempre suele ser: sonido (presión acústica) → corriente o voltaje eléctrico → movimiento de un sistema mecánico → (presión acústica) sonido.

Cada una de estas transformaciones parciales exige el empleo de dispositivos y aparatos especiales que iremos estudiando sucesivamente.

Todos los sistemas sonoros, cuando son de alta calidad, deben cumplir una serie de requisitos, para que, al reproducir fielmente las perturbaciones que los excitaron, proporcionen audiciones agradables; en una palabra, no deben introducir distorsiones.

Los tres tipos de distorsión que vamos a considerar son:
Distorsión «no lineal».
Distorsión lineal de amplitud.
Distorsión lineal de fase.

1.° Sea una señal sinusoidal pura que podemos poner de la forma:

$$s = S \text{ sen } (\omega t + \varphi),$$

que va a transformarse a través de un sistema. Si la señal representativa del fenómeno resultante es también sinusoidal pura y de la forma:

$$e = E \text{ sen } (\omega t + \psi)\ ,,$$

observaremos que para una frecuencia introducida f correspondiente a la pulsación ω $(\omega = 2\pi f)$, tenemos como frecuencia de la señal de salida otra idéntica y, por tanto, no existe distorsión «no lineal». Corrientemente, sin embargo, la señal resultante no será sinusoidal, sino solamente periódica, y, desarrollándola en serie de Fourier, se tendrá:

$$e = E_0 + E'_1 \text{ sen } \omega t + E''_1 \cos \omega t + E'_2 \text{ sen } 2\,\omega t + E''_2 \cos 2\,\omega t + \ldots + \\ + E'_n \text{ sen } nt + E''_n \cos nt + \ldots$$

es decir, que a pesar de introducir en el sistema una señal de una frecuencia única, obtenemos a la salida una señal compleja que podemos descomponer en diversas señales parciales, una de la misma frecuencia, y después todos sus armónicos. En este caso tenemos distorsión «no lineal».

Se llama coeficiente de distorsión «no lineal» a la expresión

$$D = \sqrt{\frac{E'^2_2 + E''^2_2 + E'^2_3 + E''^3_2 + \ldots}{E'^2_1 + E''^2_1}}$$

Las funciones periódicas resultantes pueden desarrollarse, también, solamente en serie de senos o cosenos, y como normalmente las amplitudes de los armónicos decrecen rápidamente, el coeficiente de distorsión suele tener la forma

$$D = \sqrt{\frac{E_2^2 + E_3^2}{E_1^2}};$$

E_1, E_2, E_3, serán ahora las amplitudes de la fundamental y de los armónicos reducidos a su forma simple, senoidal o cosenoidal. Es claro que la relación vale también para los valores eficaces. (Ver ejercicio ejemplo 1). Solamente se tiene en cuenta la existencia de 2.° y 3.° armónicos, ya que al fundamental se le considera como primero.

2.° Tengamos en cuenta el caso en que no existe distorsión «no lineal»: se tenía que para una señal de entrada $s = S$ sen $(\omega t + \varphi)$ se encontraba a la salida del sistema $e = E$ sen $(\omega t + \psi)$. Se puede expresar que las amplitudes y fases de causa y efecto están ligadas de la forma siguiente:

$$E = S \cdot f(\omega)\ ,,\quad \psi - \varphi = f'(\omega)\ ,,$$

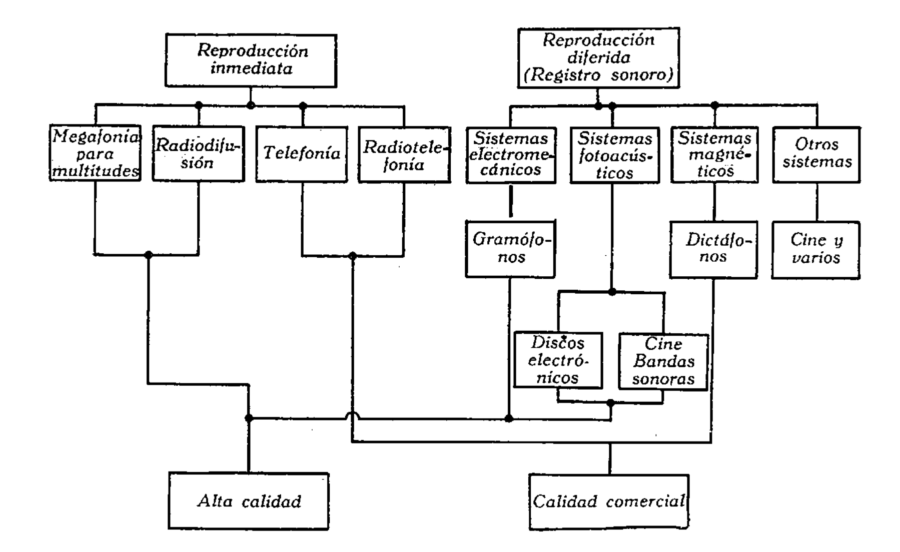
Si la función $f(\omega)$ fuese constante para cualquier frecuencia, tendríamos constante la relación E/S y no habría distorsión lineal de amplitud.

Cuando $f(\omega)$ es igual a una constante multiplicada por la frecuencia, no hay distorsión lineal de fase.

La distorsión de amplitud es muy molesta; en cambio, la de fase es poco perceptible, según las experiencias de Helmholtz.

La distorsión de amplitud se nota porqué las elongaciones máximas correspondientes a las diversas frecuencias se atenúan o amplifican desigualmente a través de los sistemas considerados.

Los sistemas sonoros admiten varias clasificaciones que aparecen en el cuadro que indicamos a continuación, y donde quedan suficientemente especificadas sus utilizaciones y características.



PRIMERA PARTE

CAPÍTULO I

Acústica

Sonido, características físicas. Cuando un punto material vibra en determinadas condiciones y está sumergido en un medio ponderal y elástico, transmite a éste sus vibraciones, las cuales, al ser captadas por nuestros órganos auditivos, producen en el cerebro una sensación especial.

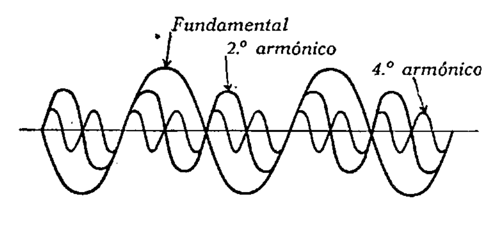




FIG. 1. Onda resultante de la composición de un movimiento sinusoidal con su 2.° y 4.° armónico

Incorrectamente se suele llamar sonido indistintamente a la causa que produce la sensación y a la sensación misma.

En todo sonido puro, como reflejo de un movimiento vibratorio sinusoidal puro, deben considerarse sus características de amplitud y frecuencia. Los sonidos que percibimos normalmente son complejos y pueden considerarse, como ya hemos hecho, como suma de otros puros de diversas frecuencias (fig. 1); debe tenerse en cuenta, además, el «timbre», o sea, la característica especial que permite distinguir los instrumentos aunque den una nota de la misma amplitud y frecuencia fundamental.

Esto es debido a que todo instrumento musical nunca produce notas puras, sino que la frecuencia fundamental viene acompañada por un cierto número de armónicos característicos.

En la figura 2 se observa esto.

Las ondas sonoras se propagan longitudinalmente en todas las direcciones del «medio», según una ley periódica en la dirección de propagación.

En las proximidades del punto perturbador las ondas sonoras son esféricas, y a mayor distancia se pueden considerar como planas.

Ecuaciones de propagación. El fenómeno de la propagación de una onda sonora en un flúido se estudia siguiendo el procedimiento empleado en hidrodinámica, por lo cual se parte de un típico sistema de ecuaciones diferenciales que aparecen en todo tratado de física [1].

---

[1] Se puede obtener el sistema de ecuaciones que resuelve todos los problemas teóricos, razonando de forma que se impongan las hipótesis particulares del caso, desde el principio:

Consideremos un paralelepípedo ideal y de aristas dx, dy, dz, sumergido en un flúido que sufre una perturbación acústica; si llamamos d_o a la densidad del flúido en reposo, la masa encerrada en el paralelepípedo valdrá

$$dm = d_o \cdot dx \cdot dy \cdot dz.$$

Al llegar en ese momento una onda acústica, ejercerá una presión P sobre las caras, que se traduce en una fuerza sobre cada una de ellas, que valdrán:

$$df_x = -\frac{\partial P}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz$$

$$df_y = -\frac{\partial P}{\partial y} dy \cdot dx \cdot dz$$

$$df_z = -\frac{\partial P}{\partial z} dz \cdot dx \cdot dy.$$

Aplicando estos valores al sistema fundamental de Mac Laurin, de dinámica:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz = d_o \cdot dx \cdot dy \cdot dz \frac{\partial u}{\partial t} \quad ,, \quad -\frac{\partial P}{\partial x} = d_o \frac{\partial u}{\partial t} \qquad (1')$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} dy \cdot dx \cdot dz = d_o \cdot dx \cdot dy \cdot dz \frac{\partial v}{\partial t} \quad ,, \quad -\frac{\partial P}{\partial y} = d_o \frac{\partial v}{\partial t} \qquad (2')$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} dz \cdot dx \cdot dy = d_o \cdot dx \cdot dy \cdot dz \frac{\partial w}{\partial t} \quad ,, \quad -\frac{\partial P}{\partial z} = d_o \frac{\partial w}{\partial t} \qquad (3')$$

Siendo u, v, w las componentes de la velocidad con que se mueve el flúido considerado sometido a las fuerzas df_x, df_y, df_z.

Aplicando el principio de la conservación de la materia dentro del recinto del paralelepípedo considerado, se puede obtener otra ecuación, la de «continuidad».

Considerando las dos caras normales a la dirección x, podemos poner:

Masa entrante por $ABCD$ $\quad dm_x = du \cdot dy \cdot dz$

Masa saliente por $EFGH$ $\quad dm'_x = du \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial (du)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz,$

ya que la densidad y la velocidad será una función de la distancia.

La variación de masa en esa dirección es, desde luego, la diferencia

$$dm_x - dm'_x = -\frac{\partial (du)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz.$$

Análogamente, en las otras direcciones:

$$dm_y - dm'_y = -\frac{\partial (dv)}{\partial y} dy \cdot dx \cdot dz$$

$$dm_z - dm'_z = -\frac{\partial (dw)}{\partial z} dz \cdot dx \cdot dy.$$

Como la variación de masa total debe ser una función de la variación de den-

Las ecuaciones a que nos referimos no se emplean en Acústica en esa forma general, sino que se reducen a otras más sencillas, haciendo hipótesis particulares.

Como en este fenómeno de propagación los desplazamientos de los puntos que vibran coinciden con la dirección de propagación del fenómeno, podemos hacer coincidir el eje de las x con dicha dirección, y así las otras coordenadas de cualquier punto son nulas, con lo cual la ecuación fundamental deducida del sistema a que hacíamos referencia queda en la forma

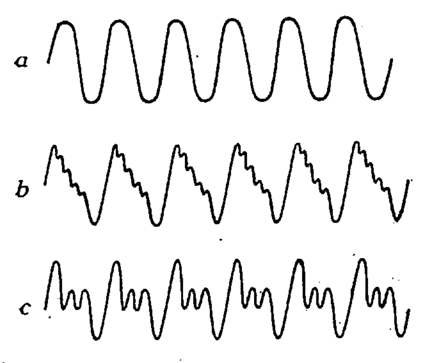


FIG. 2. *a)* forma de la nota pura de 512 c/s; *b)* la misma nota dada por un piano; *c)* la misma nota dada por un órgano

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{d_o} \cdot \frac{dP}{dx} \qquad (1)$$

u es la velocidad en un instante cuálquiera de un punto del «medio» sometido a la vibración.

d_o es la densidad del «medio» en reposo.

P es la presión instantánea en el punto de referencia.

---

sidad con el tiempo:

$$dm_T = \frac{\partial d}{\partial t}\, dx \cdot dy \cdot dz,$$

e igualando para que se cumpla el principio de conservación:

$$\frac{\partial (du)}{\partial x} + \frac{\partial (dv)}{\partial y} + \frac{\partial (dw)}{\partial z} = -\frac{\partial d}{\partial t}\ ,,$$

utilizando la definición de condensación $[d = d_o(1 + \sigma)]$, y suponiendo que tenemos variaciones infinitésimas de presión:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t} \qquad (4')$$

Las ecuaciones 1′, 2′, 3′, 4′ y la definición de condensación son las generales que constituyen el sistema que resuelve todos los casos.

Muchas veces interesa poner la ecuación de conservación en otra forma, introduciendo un escalar Y, para lo cual postulamos que la velocidad deriva de un potencial de velocidad:

$$u = -\frac{\partial Y}{\partial x}\ ,,\quad v = -\frac{\partial Y}{\partial y}\ ,,\quad w = -\frac{\partial Y}{\partial z}\ ,$$

con lo cual

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t}\ ,,$$

utilizando la 5:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -v_1^2 \frac{\partial \sigma}{\partial x}\ ,,\quad \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial Y}{\partial t}\right) = -v_1^2 \frac{\partial \sigma}{\partial x}\ ,,\quad \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = -v_1^2 \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

luego

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} = \frac{1}{v_1^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2}\ ,,\quad (5')\quad \Delta(Y) = \frac{1}{v_1^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2}$$

Con objeto de resolver el problema con facilidad, suele definirse una variable σ llamada condensación, ligada a la densidad del «medio» por la relación

$$d = d_o \cdot (1 + \sigma) \ ,,$$

d es la densidad en un instante cualquiera.

Se introduce el concepto de condensación al observar que la densidad del flúido es variable debido al movimiento de las partículas que producen enrarecimientos y aumentos de presión.

Estudiando el problema termodinámicamente y suponiendo que para una masa de flúido elegida se verifica en él una transformación adiabática, se puede transformar la ecuación (1) en la forma

$$\frac{dP}{dx} = P_o \gamma \frac{d\sigma}{dx} \qquad (2)$$

siendo P_o la presión del flúido en reposo, y γ la relación que existe entre los calores específicos a presión constante y a volumen constante:

$$\gamma = \frac{C}{c}$$

y que para los gases perfectos y para el aire se toma igual a 1,4.

De la (2) se puede deducir, integrando, $\int dP = P_o \gamma \int d\sigma$,

$$\Delta P = P - P_o = P_o \gamma \sigma ; \qquad (3)$$

ΔP o incremento de presión es una magnitud sumamente útil en estos cálculos.

Se deduce también que la velocidad de propagación del fenómeno es

$$v_1 = \sqrt{\frac{P\gamma}{d}} \qquad (4)$$

que sirve para cualquier tipo de gas y en cualquier condición de presión y temperatura.

De (2) y (1) se deduce:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{P_o \gamma}{d_o} \cdot \frac{d\sigma}{dx}$$

y como consecuencia de (4) queda:

$$\frac{du}{dt} = - v_1^2 \frac{d\sigma}{dx} \qquad (5)$$

En las aplicaciones de Electroacústica interesa solamente la propagación en el aire, y entonces la velocidad de propagación a 0° y 760 milímetros de mercurio de presión vale

$$v_o = \sqrt{\frac{P_o \gamma}{d_o}} = \sqrt{\frac{76 \times 13,56 \times 981 \times 1,4}{0,001293}} = 33120 \text{ cm/seg,}$$

ya que la presión ordinaria es 76 cm × 13,56 (densidad del mercurio en esas condiciones) × 981 dynas/cm², o sea, aproximadamente un millón de baryas o una megabarya.

Un litro de aire en condiciones normales pesa 1,293 gr, que se corresponde con una masa de 1,293 gramos-masa.

La velocidad a otra temperatura cualquiera t y a la misma presión será:

$$v_1 = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \ ,,$$

que se puede poner en la forma

$$v_1 = 331{,}2 + 0{,}6\, t \ ,, \ (t \text{ en grados centígrados}).$$

Magnitudes energéticas. Al desplazarse la masa de flúido, en cada punto existirá una cierta energía acústica, y se denomina «densidad de energía acústica en un punto» al exceso de energía que tiene el flúido por unidad de volumen alrededor del punto de referencia.

El exceso de energía se debe al desplazamiento del flúido, lo que determina un término de energía cinética, y al aumento de presión, que determina un aumento de energía potencial.

Estos sumandos vienen dados por las expresiones:

$$W_c = \frac{1}{2} d_0 u^2$$

$$W_p = \frac{1}{2} \Delta P \cdot \Delta V,$$

ya que d_0 o densidad es la masa de la unidad de volumen, en reposo; llamamos ΔP y ΔV a los incrementos de presión y volumen.

Pero $\Delta V = -\sigma$, ya que la condensación será igual y de sentido contrario a la variación de volumen, y, según (3), quedará

$$W_p = \frac{1}{2} \frac{\Delta^2 P}{P_0 \gamma}$$

y la densidad de energía sumando ambos términos podrá ponerse en la forma

$$I = \frac{1}{2} \left[d_0 u^2 + \frac{\Delta^2 P}{P_0 \gamma} \right] \ ,, \qquad (6)$$

La energía acústica total en un volumen total Ω será

$$I_\Omega = \int_\Omega I \, d\Omega \ ,,$$

Por consideraciones teóricas se puede observar que la energía acústica se transmite con una velocidad igual a la de propagación del fenómeno, y así, a través de una superficie S existirá un flujo de energía determinado.

Las magnitudes energéticas I y Φ (flujo de energía) se miden respectivamente en ergios/cm³ y ergios/segundo/cm², cuando todas las magnitudes que intervienen en las fórmulas que los definen se expresan en unidades del sistema c. g. s.

Las unidades prácticas son:

Densidad de energía	julio/cm³
Flujo de energía	watio/cm²

o sea, se han elegido unas unidades 10^7 veces mayores.

Ondas planas. Se estima que existen ondas planas cuando se han originado perturbaciones acústicas en un medio indefinido e isótropo y nos encontramos en un punto suficientemente alejado del foco sonoro.

Las condiciones de propagación son independientes de la dirección, ya que el «medio» tiene las mismas propiedades en todas direcciones.

Sea un foco que produce una perturbación de la forma $e = E$ sen $(\omega t + \varphi)$, y aun eligiendo su fase como origen de fases podemos decir que es simplemente

$$e = E \operatorname{sen} \omega t;$$

si no hay amortiguamiento, un punto que diste x entrará en vibración al cabo de un tiempo t' después, y su ecuación será

$$e' = E \operatorname{sen} \omega (t - t') = E \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right),$$

ya que t' será la relación entre la distancia y la velocidad de propagación.

Según esto, las fórmulas generales del párrafo anterior tomarán la forma

$$u = \frac{de'}{dt} = E\omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right),$$

De (5):

$$-E\omega^2 \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right) = -v_1^2 \frac{d\sigma}{dx}, \quad \sigma = \int E\omega^2 \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right) dx =$$

$$= \frac{E\omega}{v_1} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right), \tag{7}$$

De (3):

$$\Delta P = P_o \gamma \frac{E\omega}{v_1} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right), \tag{8}$$

De (6):

$$I = \frac{1}{2}\left[d_o E^2 \omega^2 \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right) + \frac{P_o^2 \gamma^2 E^2 \omega^2}{v_1^2} \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[d_o E^2 \omega^2 + d_o E^2 \omega^2\right] \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right) =$$

$$= d_o E^2 \omega^2 \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right), \tag{9}$$

Se puede observar que la energía cinética y el exceso de energía potencial son iguales, y que el valor máximo de la «densidad de energía acústica» vale:

$$I_{\text{máx}} = d_o E^2 \omega^2 = \frac{E^2 \omega^2 P_o \gamma}{v_1^2} \tag{10}$$

(llamamos aquí P_o al valor máximo de la presión), y la densidad media de energía en un período vale

$$I_m = \frac{1}{2} d_o E^2 \omega^2.$$

El flujo de energía, de lo dicho anteriormente, valdrá

$$\Phi = \frac{1}{2} E^2 \omega^2 v_1 d_o S, \tag{11}$$

y el flujo medio (por unidad de superficie):

$$\Phi_m = \frac{1}{2} E^2 \omega^2 v_1 d_o. \tag{12}$$

Ondas esféricas [1]. En todas las aplicaciones electroacústicas, el

---

[1] Se pueden deducir fácilmente las fórmulas que dan todas las magnitudes que interesan utilizando la ecuación 5'.

Utilizando coordenadas esféricas:

$$x = r \operatorname{sen} \theta \cos \varphi$$
$$y = r \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \varphi$$
$$z = r \cos \theta$$

5' queda en la forma

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial Y}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \operatorname{sen} Y} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\operatorname{sen} \theta \frac{\partial Y}{\partial t}\right) + \frac{1}{r^2 \operatorname{sen}^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{v_1^2}\frac{\partial^2 Y}{\partial t^2}$$

y como para $x = 0$, $y = 0$, $z=0$ " Y sólo es función de r y de t:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial Y}{\partial r} = \frac{1}{v_1^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2}$$

que se puede poner en la forma

$$\frac{\partial^2 (r Y)}{\partial r^2} = \frac{1}{v_1^2} \cdot \frac{\partial^2 (r Y)}{\partial t^2} \tag{6'}$$

La solución de esta ecuación es

$$rY = C_1 f_1 (r - v_1 t) + C_2 f_2 (r + v_1 t).$$

Y considerando solamente la onda progresiva, ya que el medio es indefinido, y la perturbación sinusoidal,

$$Y = v_1^2 \frac{C_1}{r} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{v_1}\right) \tag{7'}$$

$$u = -\frac{\partial Y}{\partial x} = -\frac{\partial Y}{\partial r} \cdot \frac{dr}{dx} = C_1 v_1^2 \left[\frac{\omega}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v_1}\right) + \frac{1}{r^2} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{v_1}\right)\right]$$

y definiendo $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega r}{v_1}$ y poniendo la constante C determinada por el valor de la amplitud del movimiento del foco perturbador, se obtienen las (13), (14) y (15).

foco sonoro está suficientemente alejado para poder considerar las ondas planas; sin embargo, diremos que en este caso se obtienen las siguientes expresiones para la velocidad instantánea del punto considerado, condensación y aumento de presión:

$$u = \frac{E}{r^2} \sqrt{v_1^2 + r^2 \omega^2} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v_1} + \varphi\right) \tag{13}$$

$$\sigma = \frac{E\omega}{v_1 r} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{v_1} + \varphi\right) \tag{14}$$

$$\Delta P = \frac{P_0 \gamma E\omega}{v_1} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{v_1}\right) = v_1 E\omega d_0 \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{r}{v_1} + \varphi\right) \tag{15}$$

Reflexión del sonido. Consideremos un caso en el que un foco perturbador produce vibraciones y está suficientemente alejado del sitio de observación para que podamos suponer las ondas como planas. Sea (fig. 2 bis) A el foco que produce la perturbación

$$e = E \operatorname{sen} \omega t;$$

vamos a calcular las características de vibración en un punto B situado a una distancia «x» de un obstáculo MN indeformable. El estado vibratorio de B depende de la resultante de la onda directa $A \rightarrow B$, y de la $A \rightarrow MN \rightarrow B$ reflejada. El efecto de reflexión es como si esa última onda viniese de un foco A', simétrico del A respecto al obstáculo.

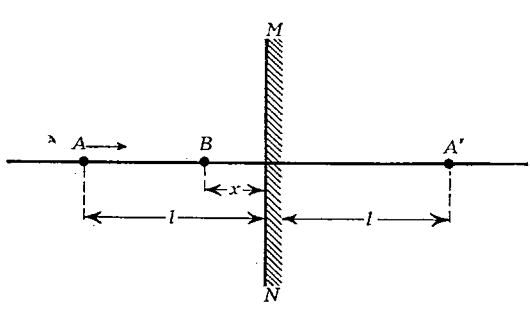


FIG. 2 bis

Debe verificarse entonces que, en un instante cualquiera, la elongación del movimiento vibratorio en B será

$$e_B = E \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{l - x}{v_1}\right) + E \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{l + x}{v_1}\right) =$$

$$= 2\, E \cos \frac{\omega x}{v_1} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{2\, l}{v_1}\right);$$

se ve, pues, que se forman ondas estacionarias, viniendo los nodos, o puntos que no vibran, y los vientres, o puntos de amplitud máxima, fijados por las condiciones siguientes:

nodos: puntos para los cuales e_B es siempre nulo.

Se determinarán por la condición $\cos \dfrac{\omega x}{v_1} = 0$,

o sea, tendremos los distintos nodos determinados por:

$$\frac{\omega x}{v_1} = \text{arc} \cos 0 \quad ,, \quad \frac{\omega x}{v_1} = (2k+1)\frac{\pi}{2} \quad ,,$$

$$x = \frac{(2k+1)\pi v_1}{2\omega} \quad ,, \quad k = 0, 1, 2 \ldots$$

vientres: puntos de amplitud máxima.

Se determinan por la condición $\cos \dfrac{\omega x}{v_1} = 1$,

y los distintos vientres quedan fijados:

$$\frac{\omega x}{v_1} = \text{arc} \cos 1 \quad ,, \quad \frac{\omega x}{v_1} = k\pi \quad ,, \quad x = \frac{k\pi v_1}{\omega} \quad ,, \quad k = 0, 1, 2 \ldots$$

Según las fórmulas del párrafo anterior, tendremos ahora como valores de velocidad del punto vibrante, condensación, etc.:

$$u = 2 E\omega \cos \frac{\omega x}{v_1} \cos \omega \left(t - \frac{2l}{v_1}\right) \quad ,,$$

$$\sigma = \frac{2E\omega}{v_1} \operatorname{sen} \frac{\omega x}{v_1} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{2l}{v_1}\right) ,,$$

$$\Delta P = 2 P_o \gamma E \frac{\omega}{v_1} \operatorname{sen} \frac{\omega x}{v_1} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{2l}{v_1}\right) =$$

$$= 2 E\omega d_o \operatorname{sen} \frac{\omega x}{v_1} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{2l}{v_1}\right)$$

$$I = 2 d_o E^2 \omega^2 \left[\operatorname{sen}^2 \frac{\omega x}{v_1} \operatorname{sen}^2 \omega \left(t - \frac{2l}{v_1}\right) + \right.$$

$$\left. + \cos^2 \frac{\omega x}{v} \cos^2 \omega \left(t - \frac{2l}{v_1}\right)\right] \quad ,,$$

El flujo de energía será evidentemente nulo.

Absorción del sonido. Aunque en el párrafo anterior hemos supuesto que el obstáculo MN reflejaba toda la energía que a él llegaba, en la práctica no ocurre así, por no existir reflectores perfectos; todo obstáculo absorbe una cierta cantidad de energía y, por tanto, refleja menos de la que le llegó.

Si llamamos K a la parte de energía reflejada cuando incide la unidad, resultaría que la forma de la onda reflejada sería:

$$KE \text{ sen } \omega \left(t - \frac{l+x}{v_1}\right),$$

y entonces la fórmula que nos indica el estado vibratorio del punto B, anteriormente considerado, vendrá dado por

$$e_B = E \left[\text{sen } \omega \left(t - \frac{l-x}{v_1}\right) + KE \text{ sen } \omega \left(t - \frac{l+x}{v_1}\right)\right] \text{ ,,}$$

Se llama coeficiente de absorción del obstáculo a la expresión

$$a = \frac{I_i - I_r}{I_i} \text{ ,,} \qquad (16)$$

siendo:

I_i la densidad de energía incidente
I_r la densidad de energía reflejada

que llegan al punto B.

Se demuestra que se verifica:

$$a = 1 - K^2 \qquad (17) \text{ ,,}$$

CAPÍTULO II

Analogías entre los sistemas mecánicos y eléctricos

Concepto de impedancia mecánica. Los dispositivos más interesantes en Electroacústica, así como los de aplicación más inmediata, son los micrófonos y los altavoces. En capítulos sucesivos estudiaremos sus características generales y los diversos tipos empleados corrientemente, pero antes es preciso dedicar atención a la teoría que hace posible su estudio matemático.

Ciertos fenómenos sonoros se estudian ahora con facilidad por la analogía que tienen con determinados fenómenos eléctricos, y para comprender esta correspondencia vamos a seguir los siguientes razonamientos:

a) Si tenemos un circuito eléctrico formado por una resistencia R, una autoinducción L y una capacidad C (estos tres elementos, en serie) y le aplicamos una fuerza electromotriz de la forma

$$e = E \text{ sen } \omega t,$$

la ecuación que da la carga «q» instantánea que toma el condensador, suponiendo el generador sin impedancia interior, es

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E \text{ sen } \omega t, \tag{18}$$

y como la intensidad en el circuito es siempre: $i = dq/dt$, se tendrá para el valor máximo de la intensidad,

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} \tag{19}$$

cuyo valor eficaz es

$$I_{eff} = \frac{I}{\sqrt{2}} = \frac{E_{eff}}{Z};$$

al denominador de esta fracción se le llama impedancia eléctrica (su módulo).

Supongamos ahora un punto material que se va a mover apoyado en una recta, solicitado por una fuerza atractiva de intensidad proporcional a la distancia existente entre cada posición instantánea y un punto que tomamos como origen. Admitamos también que al mismo tiempo el punto está sometido a una fuerza de valor dependiente del tiempo $F(t)$. La ecuación que expresa el movimiento del punto será

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F(t), \tag{20}$$

siendo m la masa del punto, r el coeficiente de rozamiento debido a existir una fuerza de frotamiento proporcional a la velocidad del móvil y que se opone a su movimiento, y k la constante de proporcionalidad por la cual hay que multiplicar en cada instante la elongación x para obtener el valor de la fuerza atractiva.

A k se le llama elasticidad.

Si $F(t)$ es de la forma F sen Ωt, o sea, es una fuerza mecánica sinusoidal de valor máximo F y pulsación Ω, como la velocidad siempre vendrá dada por la derivada del espacio respecto al tiempo $v = \frac{dx}{dt}$, integrando la ecuación se obtendrá la conocida expresión para valor máximo de la velocidad del punto:

$$V = \frac{F}{\sqrt{r^2 + \left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)^2}}, \tag{21}$$

cuyo valor eficaz será de igual modo:

$$V_{eff} = \frac{V}{\sqrt{2}} = \frac{F_{eff}}{\sqrt{r^2 + \left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)^2}}$$

Al comparar estos fenómenos se observa que vienen expresados por ecuaciones de forma análoga; luego las consecuencias que se saquen del estudio del fenómeno eléctrico pueden aplicarse al mecánico, siempre que se tenga en cuenta el siguiente cuadro de correspondencia:

Sistema eléctrico	Sistema mecánico
q cantidad de electricidad ..	x desplazamiento.
i intensidad de corriente....	v velocidad de desplazamiento.
e fuerza electromotriz	F fuerza vibromotriz.
R resistencia eléctrica	r coeficiente de frotamiento.
L autoinducción	m masa mecánica.
C capacidad eléctrica	$1/k$ inversa del coeficiente de elasticidad.

Según esto, a $\sqrt{r^2 + \left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)^2} = Z_M$

le llamaremos impedancia mecánica.

Si la fuerza que actúa sobre el punto material está producida por una presión acústica de valor máximo P, generada por una manantial sonoro, tendríamos:

$$V = \frac{P}{Z_a} ,$$

y Z_a (impedancia acústica) no es más que la anterior Z_M, que ahora llamamos de esta forma para indicar que tiene un origen acústico.

Para valores fijos de m, r y k habrá una frecuencia de vibración

$$f_r = \frac{\Omega}{2\pi}$$

que haga

$$m\Omega_r - \frac{k}{\Omega_r} = 0,$$

o sea,

$$\Omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}} ,,$$

a esta pulsación o a su correlativa frecuencia de resonancia

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

corresponde una impedancia acústica mínima, ya que se anuló el segundo sumando de la cantidad subradical. Al mismo tiempo tendremos una velocidad máxima

$$V_r = \frac{P}{r}$$

Este fenómeno de resonancia mecánica es análogo al de resonancia eléctrica, y ambos vendrán expresados gráficamente en las figuras 3 y 4.

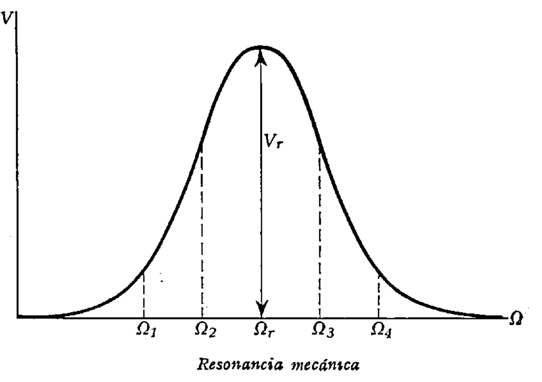


FIG. 3

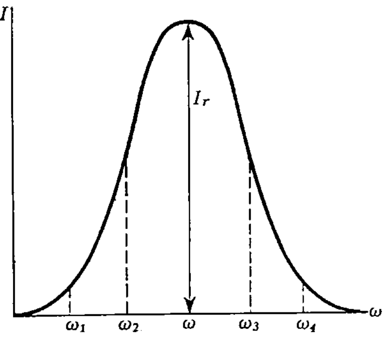
Sistemas electromecánicos. Consideremos un sistema mecánico de características m, r y k y un sistema eléctrico de constantes R, L, C, ambos acoplados entre sí, de forma que un desplazamiento del sistema mecánico a la velocidad instantánea v determina en el sistema eléctrico una corriente de intensidad también instantánea *Si* (esto ocurre en los micrófonos); y que el paso de i por el sistema eléctrico obliga al mecánico a moverse con una

velocidad Sv (altavoces). Las ecuaciones del sistema total serán:

$$\left.\begin{aligned} m\frac{d^2x}{dt^2} + r\frac{dx}{dt} + kx &= -Si + f \\ L\frac{d^2q}{dt^2} + R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} &= Sv + e \end{aligned}\right\} (1)$$

ecuaciones de las que se deduce:

$$Z_M V = -SI + F$$
$$ZI = SV + E.$$



Resonancia eléctrica

FIG. 4

Suponiendo el caso de un altavoz, en el cual el movimiento del equipo mecánico se debe exclusivamente a la acción que sobre el cono de cartón ejerce el sistema eléctrico ($F = O$), resolviendo el sistema, se tendrá:

$$I = \frac{E}{Z + \dfrac{S^2}{Z_M}}$$

se observa que, al no existir el sistema mecánico, por el eléctrico habría pasado una intensidad máxima

$$I = \frac{E}{Z},$$

---

(1) Como $\left\{\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} \\ i &= \frac{dq}{dt} \end{aligned}\right.$

las ecuaciones se transforman en:

$$m\frac{dv}{dt} + rv + k\int v\,dt = -Si + f$$

$$L\frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C}\int i\,dt = Sv + e.$$

Si, como estamos considerando, siempre f y e son funciones sinusoidales, y como las funciones derivada e integral están retrasadas y adelantadas respectivamente un ángulo $\pi/2$, se tendrá, utilizando las cantidades complejas:

$$v\left[r + j\left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)\right] = -Si + f = v\vec{Z}_M \quad ''$$

$$i\left[R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)\right] = Sv + e = i\vec{Z} \quad ''$$

y para módulos y valores máximos:

$$Z_M \cdot V = -SI + F$$
$$ZI = SV + E$$

siendo

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2};$$

pero en estas circunstancias es como si hubiésemos tenido un incremento de impedancia de valor

$$Z_D = \frac{S^2}{Z_M},$$

que recibe el nombre de impedancia dinámica y es igual al cuadrado del coeficiente de conversión electromecánico dividido por la impedancia mecánica del sistema.

Si se tratase de un micrófono, la única f. e. m. que se genera es la causada por el movimiento del sistema mecánico, y resolviendo el sistema con $E = 0$, se tendría

$$V = \frac{F}{Z_M + \frac{S^2}{Z}}$$

es decir, que por el hecho de estar acoplado al sistema mecánico uno eléctrico, la impedancia mecánica viene aumentada en

$$Z'_D = \frac{S^2}{Z}$$

llamándose a Z'_D impedancia dínamoeléctrica.

Se observa en ambos casos que las impedancias totales son variables con la frecuencia, y como es de sumo interés conseguir una independencia grande entre ω e I, o entre Ω y V, los constructores pretenden combinar los valores de las constantes para que esa dependencia se haga mínima.

Para circuitos mecánicos o eléctricos aislados, la independencia no existe, según se observa en las figuras 3 y 4; pero en el caso de estar acoplados se ha obtenido ya una modificación en la curva, según vemos: utilicemos las propiedades anteriores, y en el caso del altavoz circuito eléctrico → circuito mecánico, recordando que el módulo de la impedancia total era

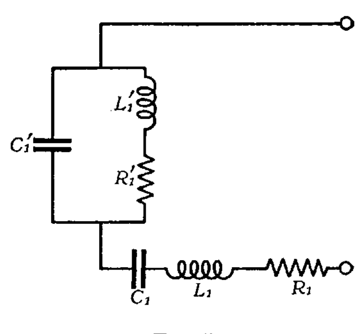


FIG. 5

$$Z_T = Z + \frac{S^2}{Z_M} = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} + \frac{S^2}{\sqrt{r^2 + \left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)^2}},$$

se puede buscar un circuito solamente eléctrico equivalente al anterior,

y éste es el representado en la figura 5, en el cual el módulo de la impedancia vale

$$Z'_T = \sqrt{R_1^2 + \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega}\right)^2} + \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R'^2_1} + \left(C'_1 \omega - \frac{1}{\omega L'_1}\right)^2}} \,.$$

Para que los circuitos sean equivalentes se deben satisfacer las igualdades:

$$R = R_1 \quad ,, \quad R'_1 = \frac{S^2}{r}$$

$$L = L_1 \quad ,, \quad L'_1 = \frac{S^2}{k}$$

$$C = C_1 \quad ,, \quad C'_1 = \frac{m^2}{S^2}$$

y entonces las propiedades del circuito electromecánico (altavoz), serán idénticas al eléctrico de la figura 5. Como en éste se demuestra que la dependencia entre ω e I está expresada por la curva de la figura 6, ya no hay una variación tan acusada, sino que entre ciertos valores de la frecuencia o de la pulsación, I varía poco. Esto es lo mismo que decir que la impedancia permanece aproximadamente constante alrededor de un valor medio para una amplia zona.

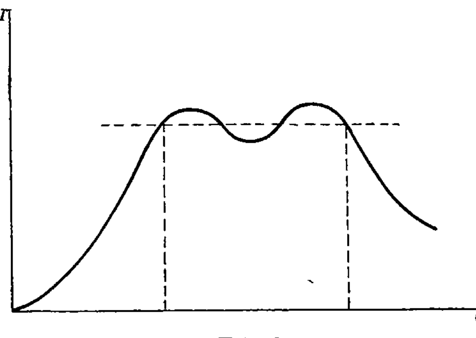


Fig. 6

En el caso del micrófono es análogo el resultado. En ambos casos se puede llegar a la expresión del rendimiento del sistema, viendo que la potencia consumida es

$$W = \frac{E^2}{R + \frac{S^2 r}{r^2 + \left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)^2}} \quad ,, \quad \text{(altavoz)}$$

y la consumida en el sistema mecánico solamente:

$$W' = \frac{E^2}{\frac{S^2 r}{r^2 + \left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)^2}}$$

CUADRO 1

Magnitudes correspondientes en los tres sistemas

Sistema eléctrico		Sistema mecánico		Sistema acústico	
Magnitud	Unidad	Magnitud	Unidad	Magnitud	Unidad
f.e.m. (e)	voltio × 10^8	fuerza (f)	dina	presión (P)	dina/cm^2
intensidad (i)	amperio × 10^{-1}	velocidad (v)	cm/seg	volumen de corriente (n)	cm^3/seg
cantidad (q)	culombio × 10^{-1}	desplazamiento (x)	cm	volumen de desplazamiento (x')	cm^3
impedancia (z_e)	ohmio × 10^9	impedancia (z_M)	ohmio mecánico	impedancia (z_a)	ohmio acústico
resistencia (r_e)	ohmio × 10^9	resistencia (r_M)	» »	resistencia (r_a)	» »
reactancia (x_e)	ohmio × 10^9	reactancia (x_M)	» »	reactancia (x_a)	» »
autoinducción (L)	henrio × 10^9	masa (m)	gramo masa	inercia (i)	masa/cm^2
capacidad (C)	faradio × 10^{-9}	$\frac{1}{\text{elasticidad}}$ $\left(\frac{1}{k}\right)$	cm/dina	capacidad (C_A)	$\frac{cm^3}{\text{densidad} \times \text{velocidad propagación}^2}$
potencia (W)	ergio/seg	potencia (W_m)	ergio/seg	potencia (W_a)	ergio/seg

con lo cual el rendimiento viene expresado por

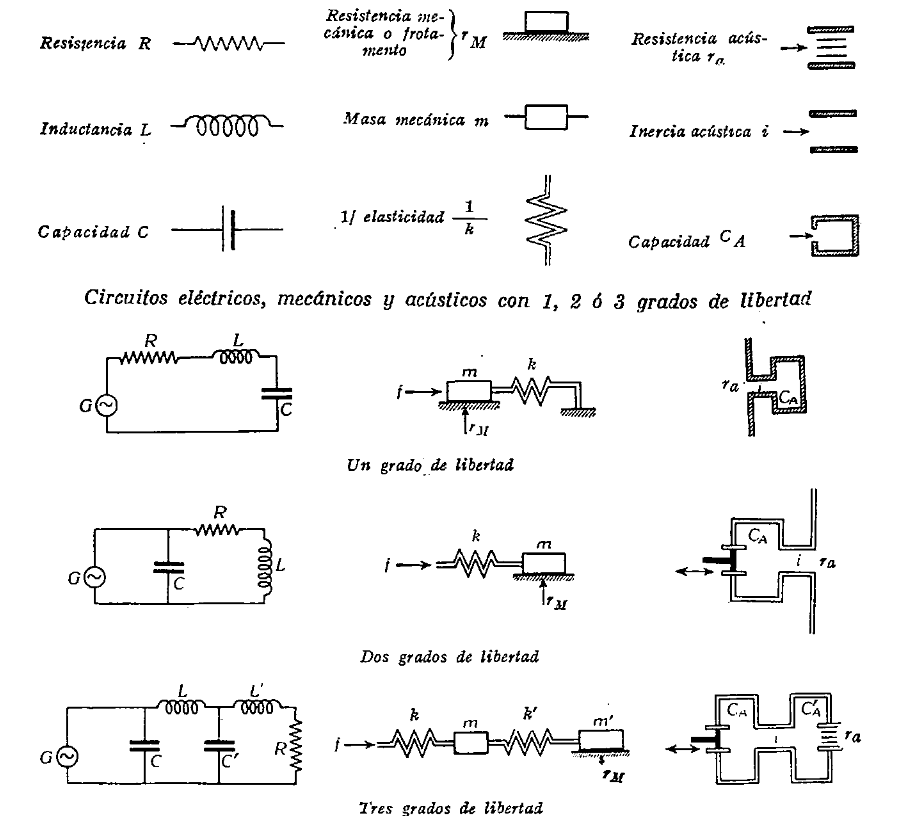
$$\rho = \frac{W'}{W} = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_D}}$$

siendo R_D (resistencia dinámica) el término

$$\frac{S^2 r}{r^2 + \left(m\Omega - \frac{k}{\Omega}\right)^2}.$$

En el cuadro siguiente indicamos una serie de representaciones de elementos eléctricos, mecánicos y acústicos, así como combinaciones sencillas de ellos.

CUADRO 2



Filtros mecánicos y acústicos. Con objeto de aislar los cuerpos que vibran de los soportes donde están colocados se intercalan unos dis-

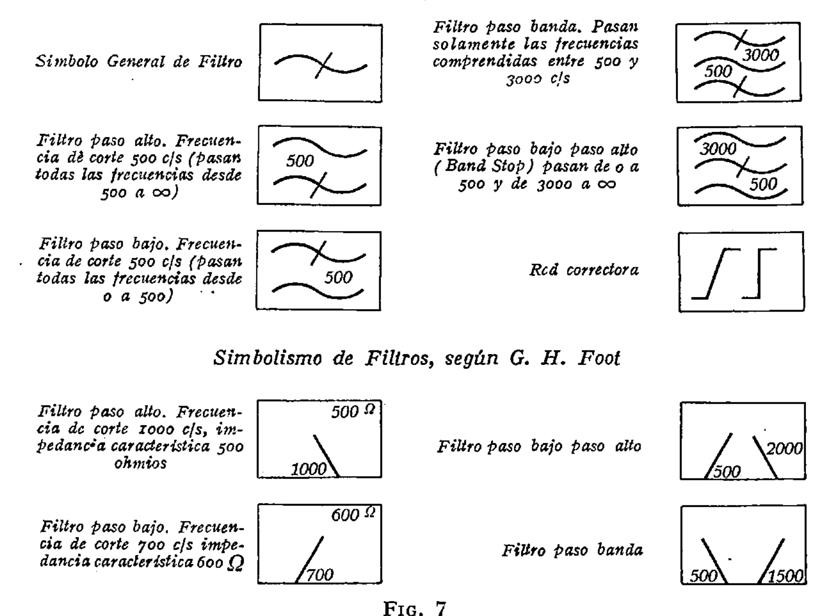


Fig. 7

positivos llamados filtros mecánicos. El concepto de filtro es mucho más amplio, pues lo mismo los eléctricos que los mecánicos pueden permitir el paso de toda las frecuencias desde O hasta una f_1; solamente las comprendidas entre f_1 y f_2, únicamente las superiores a f_2 o todas, salvo las comprendidas entre f_1 y f_2.

Pueden existir filtros-combinación de estas cuatro clases. Cada una de las clases recibe un nombre especial y se representa simbólicamente de la forma que indicamos en el cuadro de la figura 7.

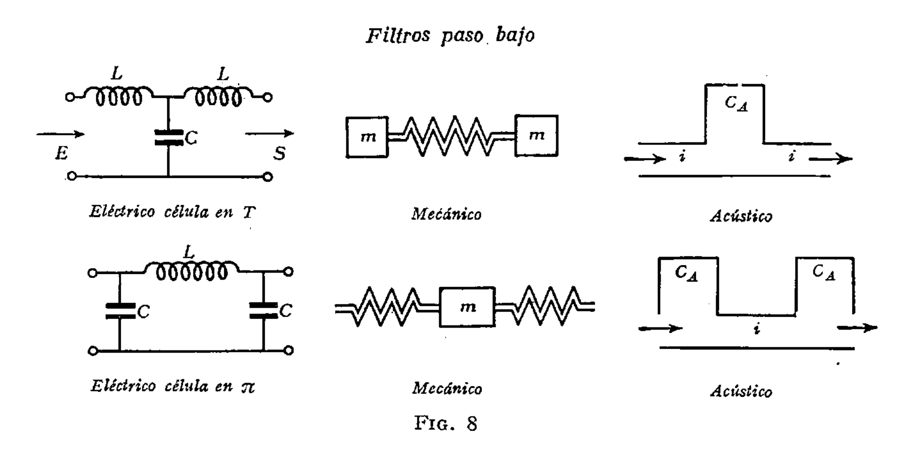


Fig. 8

Los filtros eléctricos se estudian con toda extensión en tratados especiales, y no voy a hacer mención de ellos; solamente quiero

Filtros paso alto

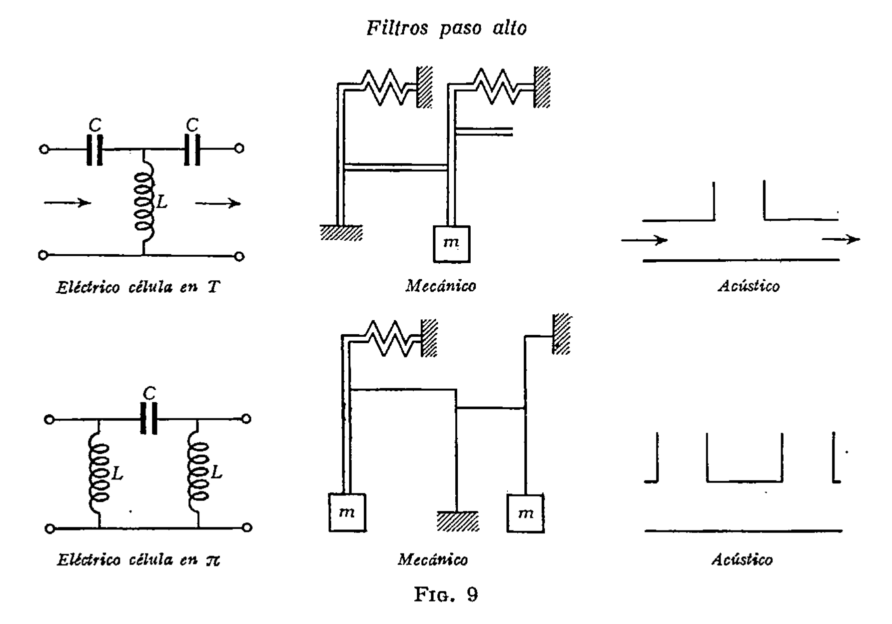


Fig. 9

indicar que, estudiada en el capítulo correspondiente la equivalencia entre los circuitos mecánicos y los eléctricos, bastará conocer el filtro eléctrico para poder determinar el mecánico o el acústico.

Los filtros acústicos se emplean para aislar de ruidos determinados recintos, tales como estudios de radiodifusión, salas de cinematógrafo, estudios, etc. (sobre este asunto trataremos más adelante).

Filtros paso banda

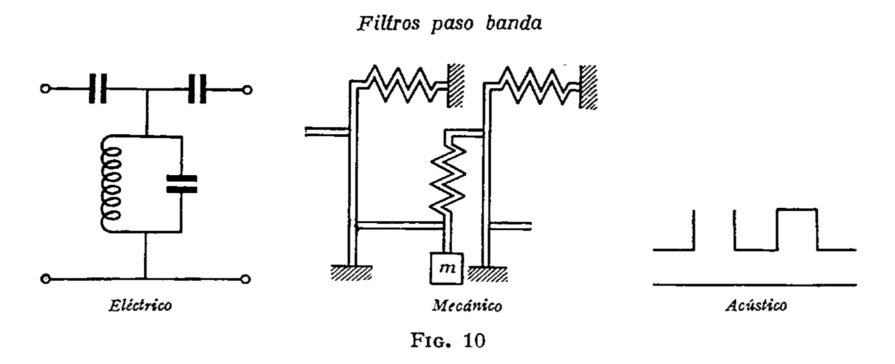


Fig. 10

En la figura 8 se ven tipos de filtro paso bajo en las tres modalidades de eléctrico, mecánico y acústico, y en forma de célula en T ó en π

simétrica. La red eléctrica permitirá el paso de las bajas frecuencias, pues las autoinducciones ofrecen reactancias $L\omega$ menores para pequeñas frecuencias; en cambio, las capacidades ofrecen $\frac{1}{C\omega}$. Si llega a E una señal compleja, las bajas frecuencias atravesarán la red y pasarán; en cambio, las altas atravesarán el primer condensador, y si alguna no es suficientemente atenuada y consigue atravesar L, se cierra por el segundo condensador.

El filtro mecánico paso bajo se obtendrá sustituyendo las autoinducciones por masas mecánicas, y las capacidades en paralelo por resortes (elasticidad) en serie.

Respecto al filtro acústico, la L significa una masa de aire vibrando dinámicamente, y la capacidad una masa de aire vibrando estáticamente.

Los filtros paso alto serán, por el contrario, de la forma indicada en la figura 9.

Los paso banda se obtienen combinando estos dos grupos, según se observa en la figura 10.

Los filtros, en la práctica, no suelen estar formados por una sola célula, sino por una serie de ellas asociadas reforzándose así sus efectos.

CAPÍTULO III

Radiadores acústicos

Generalidades. Interesa desde el punto de vista de las aplicaciones de la Electroacústica, estudiar las fuentes o manantiales sonoros que se utilizan para producir las intensidades acústicas necesarias que causen impresiones auditivas en los espectadores. Aunque más adelante se estudiarán los dispositivos que principalmente interesan — los altavoces —, debemos empezar por estudiar matemáticamente los elementos primarios o radiadores elementales, cuyo análisis nos servirá como introducción a los radiadores utilizados en la práctica.

Esfera vibrando en el sentido de su radio. Tengamos una esfera de radio R, el cual varía de longitud, según la ecuación

$$R_i = R + a \text{ sen } \omega t.$$

La velocidad de cualquier punto de la superficie de la esfera obedecerá a la condición

$$u = a\omega \cos \omega t = U \cos \omega t \qquad (21)$$

estando dirigida en la dirección del radio correspondiente al punto considerado.

Las ondas creadas al vibrar la esfera tendrán forma esférica y, por tanto, serán aplicables todas las fórmulas indicadas al estudiar la propagación de las ondas de este tipo. Como allí la velocidad de desplazamiento de una partícula situada a la distancia r del foco era

$$\frac{E}{r^2}\sqrt{v_1^2 + r^2\omega^2} \quad \cos \omega\left(t - \frac{r}{v_1} + \varphi\right),$$

debemos identificar

$$U = \frac{E}{r^2}\sqrt{v_1^2 + r^2\omega^2} \quad ,, \qquad (22)$$

Definiendo la «fuerza del foco» como el flujo de la velocidad a través de una superficie que lo envuelva:

$$F = 4\pi R^2 U \quad ,, \qquad (23)$$

y entonces las expresiones que dan la velocidad y el incremento de

presión en un punto que diste x del centro de la esfera, después de (13), (15), (22) y (23):

$$u = \frac{F}{4\pi x^2} \cdot \frac{\sqrt{v_1^2 + x^2 \omega^2}}{\sqrt{v_1^2 + R^2 \omega^2}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v_1} + \varphi\right)$$

$$\Delta P = \frac{F \omega d_o v_1}{4\pi \sqrt{v_1^2 + R^2 \omega^2}} \cdot \text{sen } \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right)$$

El valor medio de la energía radiada será el valor medio del flujo de

$$u_{\text{en fase con } \Delta P} \times \Delta P$$

a través de una superficie esférica de radio x:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{4\pi x^2} \cdot \frac{\sqrt{v_1^2 + x^2 \omega^2}}{\sqrt{v_1^2 + R^2 \omega^2}} \times \frac{\omega v_1}{\sqrt{v_1^2 + x^2 \omega^2}} \times$$

$$\times \frac{F \omega d_o}{4\pi \sqrt{v_1^2 + R^2 \omega^2}} = \frac{F^2 \omega^2 d_o v_1}{8\pi (v_1^2 + R^2 \omega^2)} \quad (24)$$

Como $F = 4\pi R^2 a \omega$ según (21) y (23), la (24) puede ponerse en la forma:

$$W = \frac{16 \pi^2 R^4 a^2 \omega^4 d_o}{8\pi (v_1^2 + R^2 \omega^2)} = \quad (25)$$

$$= \frac{2\pi R^4 a^2 \omega^2 d_o}{v_1^2 + R^2 \omega^2} \quad (26)$$

En la práctica, todos los radiadores se encuentran envueltos por un flúido que es el aire atmosférico, y este medio produce sobre ellos un efecto de impedancia reflejada que aumenta aparentemente su resistencia mecánica en r_d y su masa en m_d. Puede demostrarse que

$$r_d = \frac{\text{resistencia}}{\text{de radiación}} = \frac{2 \cdot \text{potencia radiada}}{\text{amplitud en el movimiento del radiador} \cdot \text{pulsación}}$$

y en el caso de la esfera pulsante se tendrá

$$Z_M = 4\pi R^2 d_o v_1 \left[\frac{\left(\frac{\omega}{v_1} \cdot R\right)^2 + j \frac{\omega}{v_1} R}{1 + \left(\frac{\omega}{v_1} R\right)^2} \right]$$

y separando partes real e imaginaria:

$$r_d = \frac{4\pi R^4 d_o \omega^2 v_1}{v_1^2 + \omega^2 R^2}$$

$$m_d = \frac{4\pi R^3 d_o v_1^2 \omega}{v_1^2 + \omega^2 R^2}$$

En la figura 11 se representan las componentes reactiva y resistiva de la impedancia mecánica debida a la carga del aire.

Este radiador es fundamentalmente omnidireccional en el espacio.

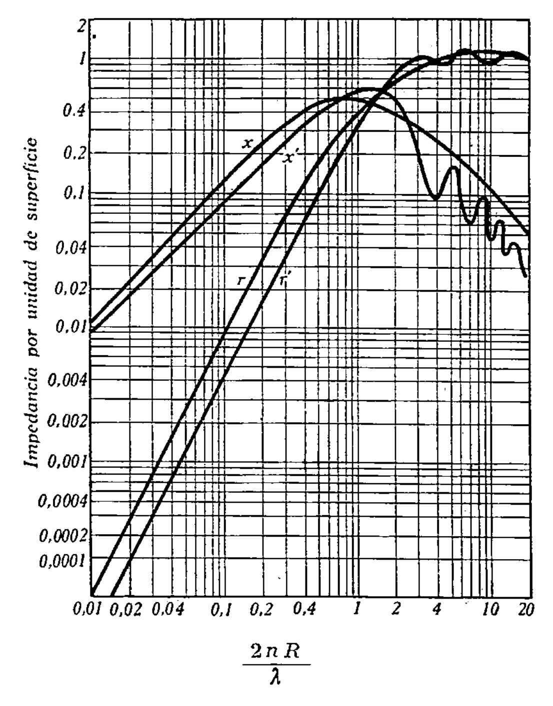


FIG. 11. Componentes resistiva y reactiva de la impedancia ofrecida por el aire a una esfera pulsante (r, x) de radio R, y a un pistón vibrante en pantalla acústica infinita (r', x'), de radio R

Foco puntual. Podíamos deducir la potencia radiada por un foco puntual haciendo R igual a cero en las fórmulas (25) ó (26), obteniéndose

$$W = \frac{F^2 \omega^2 d_o}{8 \pi v_1}, \tag{27}$$

y como $F = a \omega 4 \pi R^2$,

$$W = \frac{2 a^2 \omega^4 \pi R^2 d_o}{v_1}; \tag{28}$$

pero vamos a seguir un procedimiento directo, viendo que el potencial de velocidad después de (6') puede ponerse en la forma exponencial

$$Y = \frac{F}{4 \pi r} \cdot e^{j \omega \left(t - \frac{r}{v_1}\right)}, \tag{29}$$

utilizando (1′) y la definición de Y:

$$u = -\frac{\partial Y}{\partial r} = -\frac{F}{4\pi}\left[-\frac{1}{r^2}e^{j\omega\left(t-\frac{r}{v_1}\right)} - \right.$$

$$\left. -\frac{1}{r}\,j\,\frac{\omega}{v_1}e^{j\omega\left(t-\frac{r}{v_1}\right)}\right] = -\frac{F}{4\pi r}\left[\frac{1}{r}+j\frac{\omega}{v_1}\right]e^{j\omega\left(t-\frac{r}{v_1}\right)}, \quad (30)$$

$$\varDelta P = \frac{j\,\omega\,d_0\,F}{4\pi r}\cdot e^{j\omega\left(t-\frac{r}{v_1}\right)}, \quad (31)$$

Es fácil ver que en la expresión de la velocidad se han puesto de manifiesto sus dos componentes, siendo la segunda la que está en

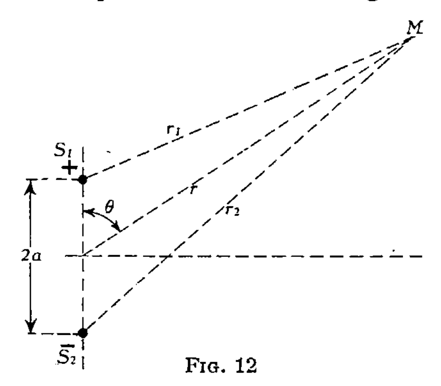


Fig. 12

fase con $\varDelta P$; por tanto, la expresión de la energía media radiada será una mitad del producto de la velocidad en fase por el incremento de presión y por la superficie esférica de radio r:

$$W = \frac{1}{2}\cdot\left(-j\frac{\omega}{v_1}\cdot\frac{F}{4\pi r}\right)\cdot\frac{j\,\omega\,d_0\,F}{4\pi r}\cdot 4\pi r^2 = \frac{F^2\,\omega^2\,d_0}{8\pi v_1}, \quad (32)$$

Foco puntual doble. Es muy interesante el caso del foco puntual doble, pues permite aplicarlo a algunos radiadores prácticos. Consideremos dos focos puntuales que vibran en oposición de fase (fig. 12); aplicando (29):

$$Y_T = Y_1 + Y_2 = \frac{F}{4\pi}\left[\frac{e^{j\omega\left(t-\frac{r_1}{v_1}\right)}}{r_1} - \frac{e^{j\omega\left(t-\frac{r_2}{v_1}\right)}}{r_2}\right] =$$

$$= \frac{F\,e^{j\omega t}}{4\pi}\left[\frac{e^{-j\frac{\omega}{v_1}(r-a\cos\theta)}}{r-a\cos\theta} - \frac{e^{-j\frac{\omega}{v_1}(r+a\cos\theta)}}{r+a\cos\theta}\right] =$$

$$= \frac{F\,e^{j\omega\left(t-\frac{r}{v_1}\right)}}{2\pi(r^2+a^2\cos^2\theta)}\left[a\cos\theta\cos\left(\frac{\omega a}{v_1}\cos\theta\right)+j\,r\,\mathrm{sen}\left(\frac{\omega a}{v_1}\cos\theta\right)\right]$$

y si el punto M está suficientemente alejado y a es muy pequeño:

$$a \ll r \;,,\; a^2 \cos^2 \theta \ll r^2$$

$$\cos\left(\frac{\omega a}{v_1} \cos\theta\right) \simeq 1 \quad ,, \quad \operatorname{sen}\left(\frac{\omega a}{v_1} \cos\theta\right) \simeq \frac{\omega a}{v_1} \cos\theta,$$

con lo que:

$$Y_T = \frac{F e^{j\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right)}}{2\pi r^2} \left[a \cos\theta + j\, r \frac{\omega a}{v_1} \cos\theta\right] =$$

$$= \frac{F a}{2\pi r} \left[\frac{1}{r} + j \frac{\omega}{v_1}\right] \cos\theta \cdot e^{j\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right)}$$

Las expresiones de u y ΔP serán:

$$u = -\frac{\partial Y}{\partial r} = \frac{F a}{2\pi} \left[\frac{2}{r^3} + j \frac{\omega}{v_1 r^2} + \right.$$

$$\left. + j \frac{\omega}{v_1} \left(\frac{1}{r^2} + j \frac{\omega}{r v_1}\right)\right] \cos\theta\, e^{j\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right)} \qquad (33)$$

$$\Delta P = -d_o \frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{F a d_o \omega}{2\pi r} \left[\frac{1}{r} + j \frac{\omega}{v_1}\right] j\omega \cos\theta\, e^{j\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right)} \;,, \qquad (34)$$

Tomando las partes reales de 33 y 34 que valen, respectivamente,

$$\frac{F a}{2\pi} \left[\left(\frac{2}{r^3} - \frac{\omega^2}{r v_1^2}\right) \cos\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right) - \frac{2\omega}{r^2 v_1} \operatorname{sen}\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right)\right] \cos\theta \;,,$$

y $$\frac{F a \omega d_o}{2\pi r} \left[\frac{1}{r} \operatorname{sen}\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right) + \frac{\omega}{v_1} \cos\omega\left(t - \frac{r}{v_1}\right)\right] \cos\theta$$

La energía media radiada en un período, considerando que r es muy grande:

$$W = \frac{1}{2} 2\pi r^2 \int_0^\pi \frac{F a \omega^2}{2\pi r v_1^2} \cdot \frac{F a d_o \omega^2}{2\pi r v_1} \cos^2\theta \operatorname{sen}\theta\, d\theta = \frac{F^2 a^2 \omega^4 d_o}{6\pi v_1^3} \qquad (35)$$

Se puede trazar la curva que exprese la distribución del potencial de velocidad en el plano horizontal; basta ver que en la fórmula que da su valor interviene $\cos\theta$.

Focos puntuales en línea recta. Interesa conocer las características de radiación de los radiadores, con objeto de saber la forma en que distribuirán el campo acústico. En el caso de tener en línea n focos puntuales separados por la distancia a y radiarse una señal de longi-

tud de onda λ, se puede poner:

$$R_\theta = \frac{P_\theta}{P_0} = \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi a n}{\lambda} \operatorname{sen} \theta\right)}{n \operatorname{sen}\left(\frac{\pi a}{\lambda} \operatorname{sen} \theta\right)} \tag{36}$$

siendo P_θ la presión acústica causada por los radiadores en un punto situado en la dirección que forma el ángulo θ con la normal a la línea de manantiales y P_0 la presión en un punto situado en esa normal y a una distancia igual del vértice.

Si llamamos l a la longitud total que ocupan la red de radiadores y hacemos que crezca indefinidamente el número de éstos, al mismo tiempo que a tiende a cero:

$$R_\theta = \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi l}{\lambda} \operatorname{sen} \theta}{\frac{\pi l}{\lambda} \operatorname{sen} \theta} \tag{37}$$

y representando esta función para diversos valores de l/λ tendremos las características de directividad de la línea de radiadores, según se indica en la figura 13.

Hemisferio que vibra radialmente. Es fácil calcular la potencia en este caso, pues no hay más que aplicar la misma fórmula

$$W = \frac{F^2 \omega^2 d_0}{8 \pi v_1};$$

teniendo en cuenta que aquí la fuerza del radiador es

$$F = 2 \cdot \pi R^2 a \omega$$

tendremos

$$W = \frac{a^2 \omega^4 \pi R^2 d_0}{2 v_1} \tag{38}$$

Pistón vibrando por una de sus caras en pantalla acústica infinita. Éste es un caso teórico que suele tener interés por la asimilación que puede hacerse a este radiador de otros prácticos.

Utilizando la fórmula (29), que da el potencial de velocidad creado por un foco puntual en un punto situado a la distancia r del mismo, y viendo que aquí si se toma un elemento dS de la superficie del pistón, la fuerza del mismo será

$$dF = u\, dS;$$

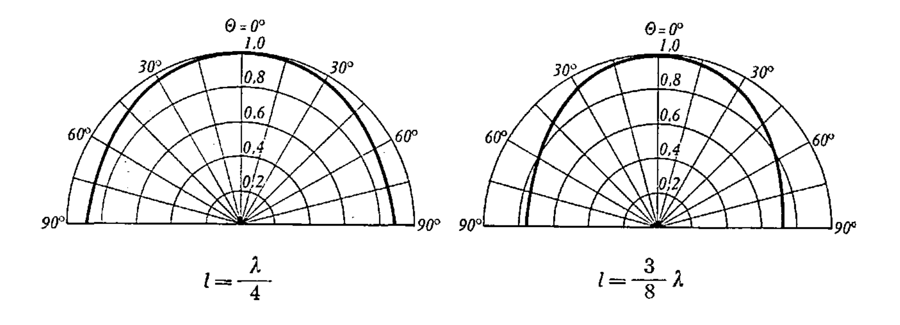
según (23) tendremos

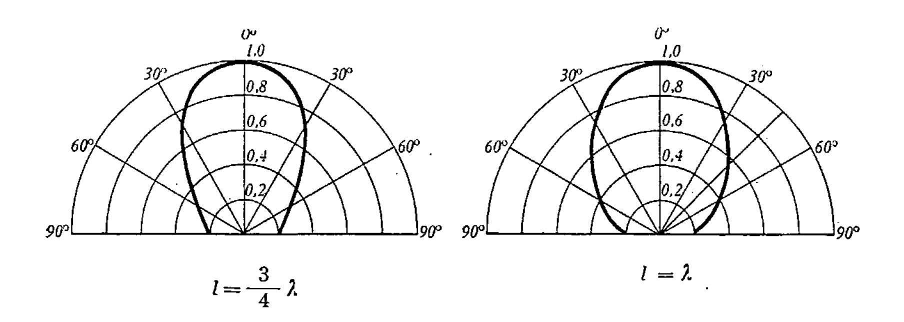
$$dY = \frac{u\, dS}{2 \pi r} e^{j \omega \left(t - \frac{r}{v_1}\right)}$$

puesto que sólo se radia en una semiesfera a la que corresponde un ángulo sólido igual a 2π.

El incremento de presión en un punto valdrá

$$d\,(\Delta\, P) = d_o \frac{\partial Y}{\partial t} = j\,\omega\, d_o \frac{u\, dS}{2\,\pi\, r}\, e^{j\,\omega \left(t - \frac{r}{v_1}\right)}$$





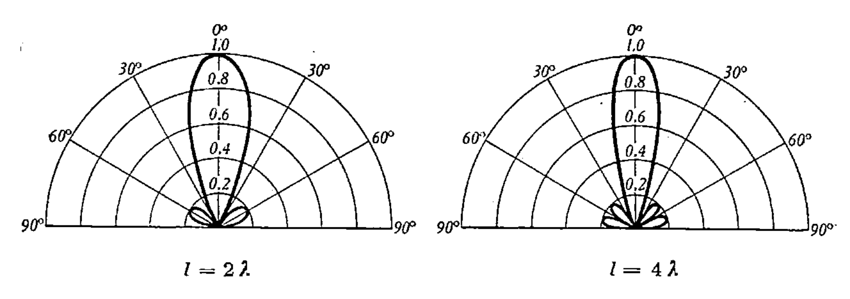


FIG. 13. Diagrama de radiación de un conjunto de focos puntuales en línea, y en función de la relación existente entre la longitud de la fila de focos y la longitud de onda. La longitud del eje del lóbulo principal es arbitraria y se elige en la dirección del ángulo 0°

y considerando todo el pistón integraremos extendiendo a toda la superficie del mismo. Esa integral se resuelve con ciertas dificulta-

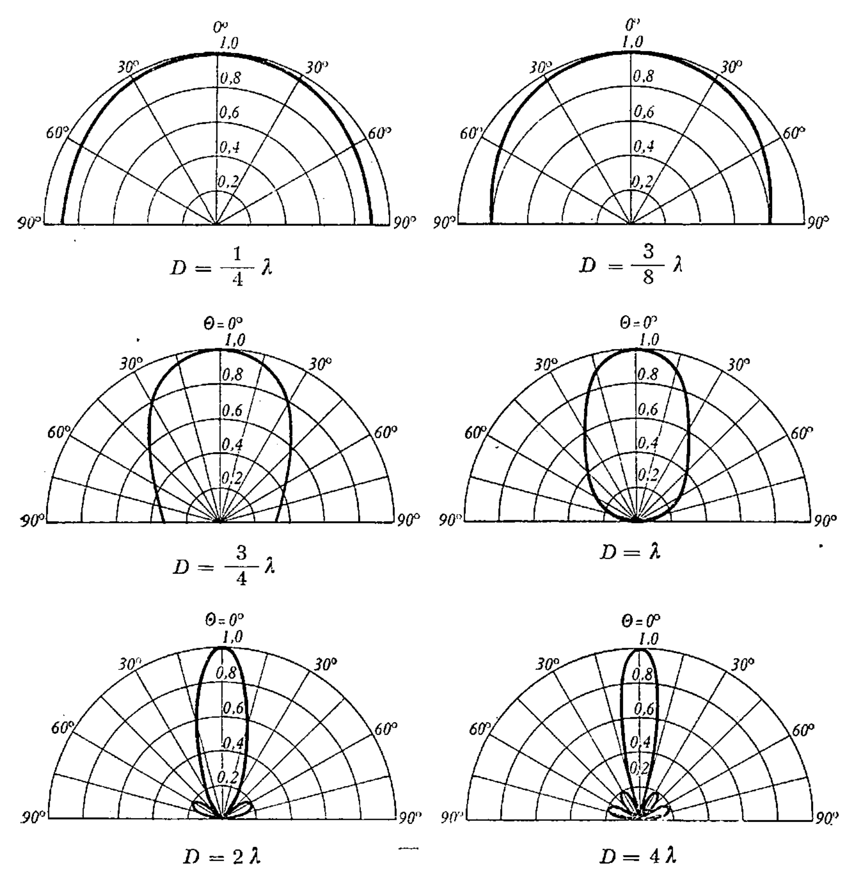


FIG. 14. Diagrama de radiación o característica de direccionalidad de un pistón vibrante en pantalla acústica infinita; los diversos diagramas corresponden a distintos pistones de diámetros que guardan distintas relaciones con la longitud de onda de la vibración

des, y nosotros sólo daremos el resultado de las impedancias mecánica y acústica creadas por el aire sobre el radiador; éstas son:

$$Z_M = \frac{f}{u} = d_o v_1 \left[S \left(1 - \frac{J_1\left(2 \frac{\omega r}{v_1}\right)}{\frac{\omega r}{v_1}} \right) + j \frac{\pi}{2 \frac{\omega^2}{v_1^2}} Y_1\left(2 \frac{\omega r}{v_1}\right) \right] \qquad (39)$$

$$Z_a = \frac{\Delta P}{Su} = \frac{d_o v_1}{S} \left[\left(1 - \frac{J_1\left(2 \frac{\omega r}{v_1}\right)}{\frac{\omega r}{v_1}} \right) + j \frac{\pi}{2 \frac{\omega^2 r^2}{v_1^2}} Y_1\left(2 \frac{\omega r}{v_1}\right) \right] \qquad (40)$$

siendo J_1 e Y_1 las funciones de Bessel de grado uno y de primera y segunda especie, respectivamente. S es la superficie del pistón.

En la figura 11 se indican las componentes resistiva y reactiva por unidad de superficie de esta impedancia.

En la figura 14 se pueden observar las características de directividad de un pistón vibrante de diámetro D para diversas frecuencias.

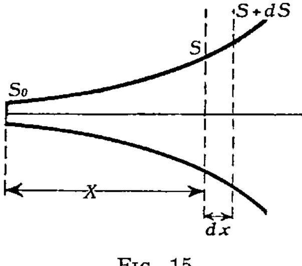


FIG. 15

Bocinas. Se denomina bocina, en acústica, a un tubo de sección creciente, según una cierta ley, y de paredes pulimentadas para que prácticamente no sean absorbentes.

El estudio de la propagación en las bocinas sería muy dificultoso si no hiciéramos hipótesis particulares que no alejadas de las condiciones reales nos simplifiquen el problema. Rayleigh estudió la propagación en el caso de una bocina infinita; y aunque se comprende la necesidad de que este dispositivo sea finito en sus aplicaciones, podemos tomar las consecuencias del caso ideal para los particulares que ocurren en la práctica.

Para poder acoplar una bocina al verdadero manantial sonoro tendremos que partir de una determinada sección en la misma, que suele llamarse garganta (fig. 15).

Admitiendo que la sección de la bocina es mucho menor que la longitud de onda del sonido, se obtiene como ecuación general de las bocinas que nos da las condiciones de propagación, y en función del potencial de velocidad (¹) se obtiene la fórmula

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \frac{\partial Y}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\log_e S) - \frac{1}{v_1^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0 \qquad (41)$$

(¹) La ecuación de continuidad (4') ya deducida:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = - \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

nos permite, eligiendo como dirección de propagación el eje de la bocina que tomamos como eje x, ponerla en la forma

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} - \frac{v_1^2}{S} - \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial Y}{\partial x} \right) = 0,$$

ya que

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad ,, \quad u = - \frac{\partial Y}{\partial x} \quad ,, \quad \frac{\partial Y}{\partial t} = v_1^2 \sigma$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (Su) = - S \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

pero como

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial \log_e S}{\partial x}$$

obtenemos la (41).

La forma de variación de S con la abscisa determina la denominación que recibe la bocina.

Llamando S_o a la sección del cuello, se puede poner

$$S = S_o f(x),$$

y si, $f(x) = x^m$, se llama bocina potencial, que para:

$m = 0$ se transforma en un tubo.
$m = 1$ el perfil es parabólico.
$m = 2$ el perfil es cónico.

Si $f(x) = e^{mx}$, se llama bocina exponencial.

Existen más tipos de bocinas, pero rara vez tienen aplicación práctica.

Bocina cónica de longitud infinita. Partiendo de

$$S = S_o \cdot x^2 \text{ ,, } \log S = \log S_o + 2 \log x$$

y sustituyendo en (41):

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \frac{\partial Y}{\partial x} \cdot \frac{2}{x} - \frac{1}{v_1^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0,$$

de la cual se puede pasar a

$$\frac{1}{v_1^2} \frac{\partial^2 (x Y)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 (x Y)}{\partial x^2} \tag{42}$$

ecuación análoga a la (6′), teniendo, por tanto, la misma solución, y siendo aplicables aquí todas las fórmulas de las ondas esféricas.

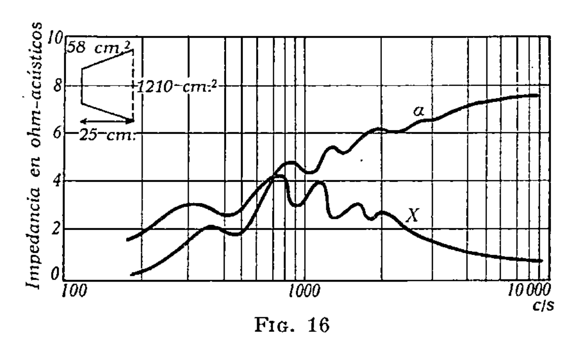


FIG. 16

Se puede poner, viendo que, como siempre, la impedancia acústica es la relación entre la presión y el flujo de velocidad a través de la superficie,

$$Z_a = \frac{d_o v_1}{S_x} \cdot \frac{\dfrac{\omega^2}{v_1^2} x^2 + j \dfrac{\omega^2}{v_1^2} x}{1 + \dfrac{\omega^2}{v_1^2} x^2} \tag{43}$$

siendo x la distancia entre el principio de la bocina y la superficie considerada. En la figura 16 se dan las componentes resistiva y reactiva

de la impedancia acústica en el cuello de una bocina acústica de las dimensiones que se indican.

Generalmente, en el cuello de las bocinas se coloca como verdadero manantial acústico un disco que vibra, y llamando R al radio del disco que coincide con el radio de S_o se puede obtener que la potencia radiada es

$$W = \frac{d_o \omega^4 R^2 a^2 h}{v_1} \tag{44}$$

siendo:

a la amplitud eficaz en el movimiento vibratorio del disco.

h la distancia que existe entre S_o y el vértice ideal de la bocina.

Bocina exponencial de longitud infinita. La condición ya dijimos que era

$$S = S_o\, e^{mx},$$

con lo cual:

$$\log_e S = \log_e S_o + mx,$$

y sustituyendo en la (41):

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + m \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{1}{v_1^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0.$$

Si la perturbación es sinusoidal:

$$Y = Y_o \cos \omega t \;,,\; \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = -\omega^2 Y,$$

y entonces:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + m \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\omega^2}{v_1^2} Y = 0 \tag{45}$$

ecuación cuya solución es

$$Y = C_1 e^{-\frac{mx}{2}} \cdot \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{\omega^2}{v_1^2} - \frac{m^2}{4}} \cdot x + \varphi \right) \cos \omega t \tag{46}$$

siendo C_1 y φ constantes a determinar, según las condiciones del caso.

Conocido el potencial de velocidades, se puede determinar como siempre la velocidad y el incremento de presión en un punto cualquiera de la bocina, y como consecuencia se obtiene la expresión de la impedancia acústica:

$$Z_a = \frac{v_1 d_o}{S_o} \left[\sqrt{1 - \frac{m^2}{4 \frac{\omega^2}{v_1^2}}} + j \frac{m}{2 \frac{\omega}{v_1}} \right] \tag{47}$$

En la figura 17 se indican las curvas que dan las componentes resistiva y reactiva de una bocina exponencial para varios casos de distintas dimensiones.

Debe observarse que por ser la velocidad de propagación de la onda:

$$v_p = \frac{\omega}{\text{constante de fase}} = \frac{v_1}{\sqrt{1 - \dfrac{m^2 v_1^2}{4\,\omega^2}}} \qquad (48)$$

es mayor que la de propagación de una onda esférica.

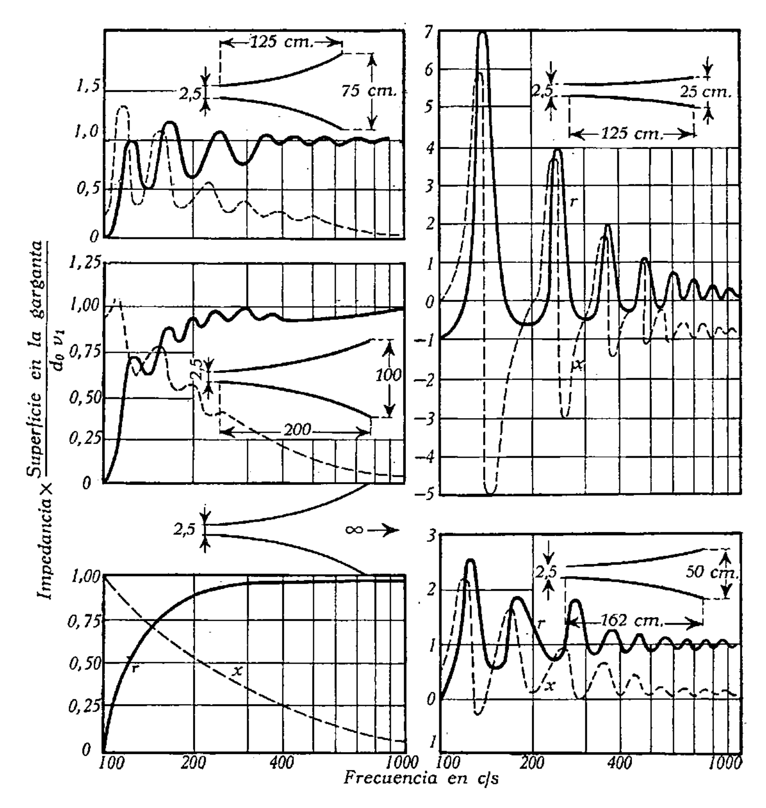


Fig. 17. Impedancia en la garganta de varias bocinas exponenciales, frecuencia de corte 100 c/s. La línea llena corresponde a la componente resistiva, y la de puntos a la reactiva

v_p se hará infinita para

$$4\,\omega^2 = m^2 v_1^2,$$

o sea, a una frecuencia

$$f_c = \frac{v_1 m}{4\,\pi} \quad ,, \qquad (49)$$

que podemos considerar de corte, pues para otra menor, al hacerse v_p imaginaria, nos permite deducir que ya no existirá propagación.

Si igualmente que en el caso anterior suponemos se coloca un disco vibrante en el fondo de la bocina y de radio R, siendo a la ampli-

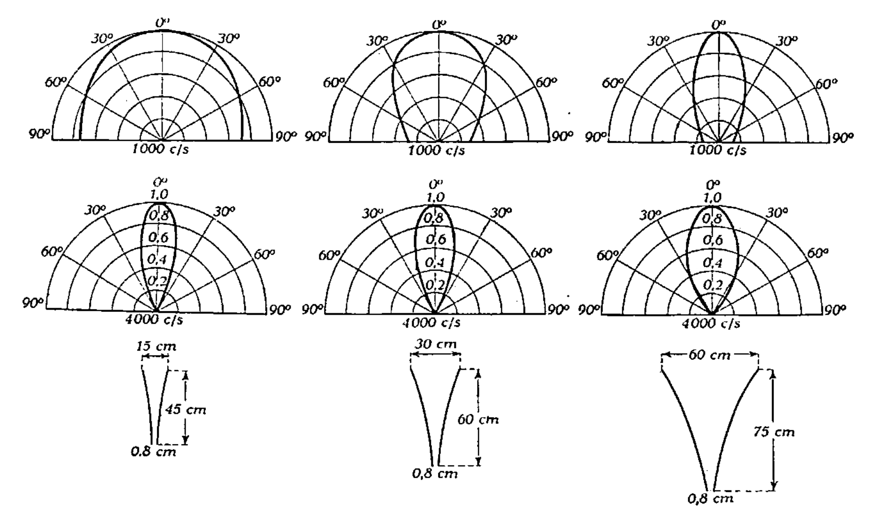


FIG. 18. Diagrama de radiación de una bocina exponencial en función de la frecuencia y para varias relaciones de diámetro de la boca y longitud de eje

tud eficaz de su movimiento, la expresión de la potencia radiada será

$$W = d_0 \pi R^2 \omega^2 v_1 a^2 \sqrt{1 - \frac{m^2 v_1^2}{4 \omega^2}} \qquad (50)$$

En la figura 18 se indican los diagramas de directividad de varias bocinas exponenciales.

CAPÍTULO IV

Micrófonos

Características generales de los micrófonos. Se llaman micrófonos a los sistemas acústico-mecánico-eléctricos que transforman la energía sonora en energía eléctrica. Esta energía eléctrica es posteriormente utilizada en otros dispositivos eléctricos, como los amplificadores.

Todo micrófono consta de un sistema mecánico y un sistema eléctrico. Al llegar una onda sonora portadora de una cierta energía acústica, el sistema mecánico se mueve y determina una variación de intensidad o voltaje en el sistema eléctrico, según determinadas leyes y de acuerdo con el principio físico aplicable dependiente de la clase de micrófono.

Pueden clasificarse los micrófonos con relación al sistema mecánico o al eléctrico. Si la fuerza aplicada al sistema mecánico es proporcional al exceso de presión acústica originada por la onda sonora en el punto donde se halla, los micrófonos se llaman de «presión», y si la fuerza es proporcional a la velocidad que alcanzan las partículas del «medio» donde está colocado el micrófono, éste se llama de «velocidad».

Más corrientemente se clasifican estos aparatos de acuerdo con el fenómeno físico que realiza la transformación de energía mecánica en eléctrica, y así se tienen los de resistencia variable o de contacto imperfecto, los electrostáticos, de bobina, y los de cristal o piezoeléctricos.

En todos los casos se pretende obtener una fuerza electromotriz que siga la misma ley de variación que el fenómeno que la origina; por ejemplo, en los de carbón se desea obtener proporcionalidad entre las elongaciones de los puntos de la membrana vibrante y las variaciones de corriente generadas; y en los electrodinámicos, proporcionalidad entre las velocidades de desplazamiento de la bobina y la f.e.m. producida.

Los micrófonos son sensibles cuando producen tensiones grandes para pequeñas presiones acústicas, y son de gran fidelidad cuando reproducen con exactitud todas las frecuencias, es decir, tienen un rendimiento constante.

Micrófonos de contacto imperfecto. Estos micrófonos no debían estudiarse si pretendemos tener en cuenta los sistemas de «alta calidad»; sin embargo, todavía se utilizan algunos micrófonos de este

tipo hasta en emisoras de radiodifusión, por lo cual incluímos su estudio.

En telefonía comercial son ampliamente usados por su baratura y sencillez.

Es claro que si tenemos un circuito constituído por una resistencia r_o, una batería de f.e.m. E y un dispositivo que comprende un contacto cuya resistencia eléctrica varía en función de la presión que sobre el contacto ejerce una membrana que vibra debido a variaciones de presión acústica, se tendrá una corriente continua circulando por el circuito cuando la membrana no vibra, pero ésa será variable cuando, por ejemplo, se hable delante de la membrana.

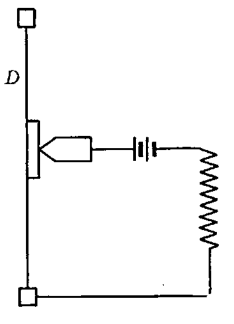


FIG. 19. Esquema teórico de un micrófono de botón de carbón

Se han utilizado tres principios distintos para obtener una resistencia variable en el contacto, prototipo de los cuales fueron los micrófonos de Berliner, Hughes y Edison. El primero variaba la superficie de contacto entre los terminales, el segundo variaba la presión del contacto entre los mismos, y Edison empleó como elemento de variación la de presión sobre una cápsula de carbón.

Los micrófonos de carbón se hicieron de tipos diversos, pero solamente los de granalla y los de lápiz se utilizan ahora.

El estudio de los micrófonos de carbón es difícil, pues no se conoce exactamente la ley de variación de la resistencia con las variaciones del contacto. Sin embargo, puede suponerse con poco error que para separaciones pequeñas del diafragma la variación de resistencia es proporcional a la separación del mismo.

Según esto, supongamos un circuito microfónico (fig. 19) en el que D es el diafragma unido a una pastilla de grafito, que a su vez se apoya en una punta hecha también de grafito. Si es r_o la resistencia de ese dispositivo para la posición de reposo de la membrana, cuando ésta haya sufrido una elongación x, el conjunto ofrecerá una resistencia

$$r = r_o + k\,x \quad ,,$$

siendo k una constante de proporcionalidad que nos hace la ecuación homogénea.

Si delante de la membrana se produce un sonido de frecuencia f (pulsación $2\pi f = \omega$), la membrana vibrará con elongaciones

$$x = a \cdot \text{sen } \omega t,$$

y la resistencia en un instante cualquiera será

$$r = r_o + ka \text{ sen } \omega t \quad ,,$$

la intensidad en ese mismo instante valdrá

$$i = \frac{E}{R + r_o + ka \operatorname{sen} \omega t} = \frac{E}{(R + r_o)\left[1 + \dfrac{ka}{R + r_o} \operatorname{sen} \omega t\right]} =$$

$$= \frac{I_o}{1 + \dfrac{ka}{R + r_o} \operatorname{sen} \omega t} \quad ,,$$

y desarrollando en serie,

$$i = I_o \left[1 - \frac{ka}{R + r_o} \operatorname{sen} \omega t + \left(\frac{ka}{R + r_o}\right)^2 \operatorname{sen}^2 \omega t \ldots \right] \quad ,,$$

Vemos, pues, que la intensidad de la corriente oscila alrededor del valor I_o que tiene en reposo.

Se debe observar también que estos micrófonos introducen distorsión «no lineal», ya que los términos en potencias de la función sen ωt se pueden a su vez poner en la forma de senos y cosenos de los ángulos múltiplos de ωt, y eso es lo mismo que decir se introducen los armónicos de la frecuencia f. Sin embargo, como

$$\frac{ka}{R + r_o} \quad \text{es} < 1$$

en la práctica, la intensidad de estos armónicos decrece rápidamente.

Si llamamos S_p a la superficie de la membrana y ΔP al incremento de presión producido por un sonido que ataca al micrófono, la fuerza que actúa sobre la membrana tendrá un valor máximo:

$$F = \Delta P \cdot S_p \quad ,,$$

y utilizando las fórmulas del Capítulo II, la velocidad máxima del desplazamiento será

$$V = \frac{\Delta P \cdot S_p}{Z_M + \dfrac{S^2}{Z}}$$

y como

$$v = \frac{dx}{dt}, \qquad x = \int v \, dt$$

que dependerá de la frecuencia, ya que v depende de ella por serlo la impedancia mecánica.

Se introduce también, por lo que hemos visto, distorsión lineal de amplitud, o sea, que habrá frecuencias para las cuales la eficacia será mayor que para otras; además, hay que tener en cuenta que existe una pulsación de resonancia determinada por el coeficiente de elasticidad «k» y por la masa «m» de la membrana, según la fórmula ya mencionada:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

y esa frecuencia correspondiente sería muy reforzada.

Se debe, como norma general, pretender que la frecuencia de resonancia quede por encima de las audibles, pero a pesar de construirse membranas muy elásticas y de poco peso, las frecuencias de resonancia no se pueden elevar más de 6000 ó 7000 c/s.

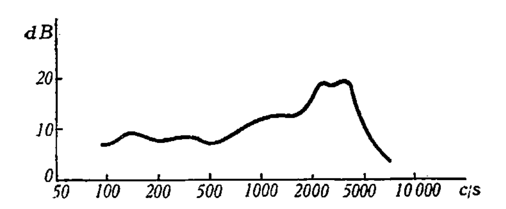


Fig. 20. Curva relativa de respuesta de un micrófono de carbón

En la figura 20 se indica la curva relativa de respuesta de un micrófono de carbón corriente. En ordenadas se cuentan niveles de salida respecto a uno tomado como referencia, expresados en decibelios y en abscisas frecuencias. Se observa que entre 80 y 700 c/s la respuesta es uniforme, y a partir de esa frecuencia empiezan a reforzarse las respuestas. La frecuencia de resonancia se encuentra a 4000 c/s aproximadamente, y a partir de 5500 c/s cae rapidísimamente la eficacia. Las desventajas principales de los micrófonos de carbón, son:

1.° Necesitan alimentación, lo que obliga a disponer en los amplificadores donde se insertan, tensión rectificada de 4, 6 ó 12 voltios.

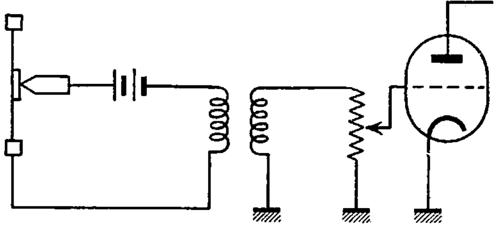


Fig. 21. Modo de adaptar un micrófono de carbón al amplificador

2.° El acoplamiento del micrófono de carbón al amplificador se hace a través de un transformador (fig. 21) que adapte la baja impedancia del micrófono a la de entrada del amplificador. Generalmente se emplean transformadores de relación $^1/_{20}$. Debido a esto se introducen transitorios que se ponen muy de manifiesto si se quieren transmitir sonidos muy cortos que no dan tiempo a que se establezca el régimen permanente.

Fig. 22. Micrófono de carbón *push-pull*

3.° Tienen eficacias variables (distorsión lineal de amplitud).

4.° Introducen distorsión lineal (armónicos).

5.° Tienen frecuencias de resonancia bajas.

Frente a estas desventajas presentan a su favor la particularidad de proporcionar un rendimiento medio bastante elevado. El nivel de salida en audiofrecuencia de un micrófono de carbón es de unos —50 dB tomando como nivel cero el de seis miliwatios.

Micrófonos de carbón especiales. Hemos visto que los micrófonos de carbón introducen todos los armónicos; con objeto de eliminar los de orden par, se ha dispuesto el montaje de un micrófono especial formado por una lámina metálica que hace de diafragma y dos cilindros de carbón que la presionan por ambos lados (fig. 22).

Este dispositivo funciona de modo que cuando el diafragma presiona sobre el cilindro superior, aumenta la resistencia del contacto con el inferior; de esta forma las ecuaciones que dan la intensidad de cada unidad serán:

$$i_a = I\left[1 + \frac{kx}{R + r_o}\,\text{sen}\,\omega t - \left(\frac{kx}{R + r_o}\right)^2 \text{sen}^2\,\omega t + \dots\right]$$

$$i_b = I\left[1 + \frac{kx}{R + r_o}\,\text{sen}\,\omega t + \left(\frac{kx}{R + r_o}\right)^2 \text{sen}^2\,\omega t + \dots\right]$$

y la intensidad resultante es:

$$i_r = 2I\left[1 + \frac{kx}{R + r_o}\,\text{sen}\,\omega t \dots\right]$$

libre de armónicos pares.

Como vemos, este dispositivo funciona de forma análoga a como lo hacen dos tubos electrónicos en contrafase *(push-pull)*, y con este mismo nombre se denomina el micrófono.

A pesar de que teóricamente hemos suprimido los armónicos pares, en la práctica únicamente se puede lograr atenuarlos suficientemente, ya que ambas cápsulas no son idénticas y los factores k siempre serán algo distintos. Muchas veces se sustituye el cilindro de carbón por un saquete o cápsula de gránulos del mismo elemento, los cuales cambian de posición al llegar a ellos una onda acústica y, por tanto, varía la resistencia que ellos ofrecen. Estos micrófonos de cápsula son casi los utilizados exclusivamente en telefonía comercial.

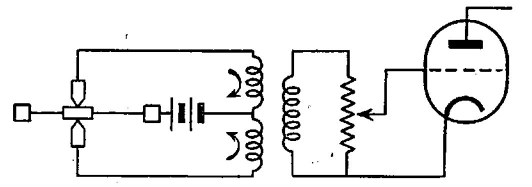


FIG. 23. Adaptación de un micrófono *push-pull* al amplificador

Los gránulos de grafito se obtienen triturando éste hasta conseguir un tamaño adecuado determinado por la condición de que dichos gránulos pasen por una criba del cuatro y no por una del tres. Es preciso que sea un carbón exento de partículas metálicas, y previamente se ha calentado a 70° durante un cierto número de horas, lavándose después los gránulos con éter.

Un defecto importante de todos estos micrófonos es que a continuación de traducir un sonido fuerte, como los gránulos han sufrido unas presiones fuertes y se apelmazan, éstos no recobran sus posiciones normales, y los sonidos débiles que pueden seguir no son reprodu-

cidos siguiendo la misma ley de la constante k de conversión de elongaciones en resistencia eléctrica, con lo cual se producen distorsiones de amplitud. Esto se atenúa con los micrófonos de contacto múltiple,

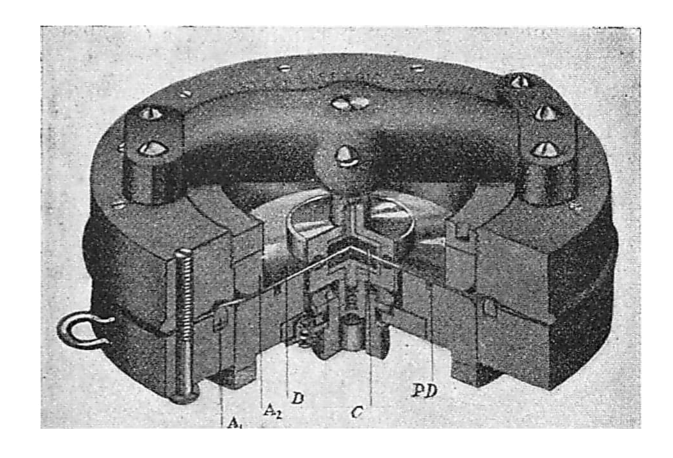


FIG. 24

realizados disponiendo frente al diafragma una serie de células de carbón montadas en paralelo y de forma que unas respondan bien a las elongaciones grandes y otras a las pequeñas. También hay micrófonos más complicados con unidades en serie y otras en paralelo; las primeras, al aumentar la resistencia del conjunto atenúan los armónicos, y las segundas hacen el efecto beneficioso que hemos indicado.

Micrófonos de carbón de alta calidad. Vamos a describir someramente el micrófono en *push-pull* de la Western Electric y el de Reisz, que se pueden considerar de alta calidad.

El primero, según se ve en la figura 24, está constituído por un diafragma de duraluminio D sujeto por su borde entre las superficies A_1 y A_2, que, además, permiten tensarlo todo lo que se pueda, según su resistencia mecánica, ganando así fidelidad. A_1 presiona en una placa metálica rígida que amortigua las vibraciones propias del diafragma. En C se ven ambas cápsulas de carbón.

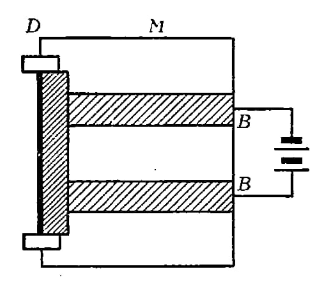


FIG. 25. Micrófono Reisz

El micrófono Reisz (fig. 25) tiene las siguientes particularidades: el diafragma no es conductor, es de caucho muy fino o tela vulcanizada y forma la pared de un depósito de gránulos de carbón de tamaños distintos; el bloque M es de mármol, y las barras B son de grafito.

Este micrófono tiene mayor fidelidad que los restantes de carbón, pues no tiene diafragma metálico que vibre mecánicamente; además, el «soplo» de fondo — defecto común a los micrófonos de carbón, debido a la corriente continua de alimentación — es menor, pues se alimenta a 6 voltios con un consumo de unos 10 miliamperios; en cambio, el Western se alimenta a 12 voltios y consume 20 miliamperios.

El nivel de salida es de —70 dB respecto al nivel cero de seis miliwatios.

Micrófono electrostático. Reciben este nombre los micrófonos cuyo estudio hacemos a continuación, porque se funda su funcionamiento en la variación de capacidad que sufre un pequeño condensador, que, en esencia, constituye el micrófono.

La teoría puede exponerse de una forma sencilla del modo siguiente: Sea C (fig. 26) el condensador de referencia montado en serie con una batería de f.e.m. E y con una resistencia R. Siendo la capacidad de un condensador plano:

$$C = \frac{KS}{4\pi e}$$

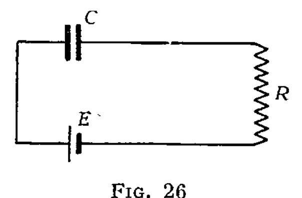


FIG. 26

expresión en la que S es la superficie de una de las láminas, K la constante dieléctrica de la substancia que separa dichas láminas y e la distancia de separación entre las mismas, al producir delante del micrófono (condensador) una perturbación acústica, la lámina móvil (la otra armadura se fija completamente) entrará en vibración, modificándose la distancia e y, por tanto, la capacidad.

Si el sistema mecánico de este micrófono (armadura vibrante del condensador) responde de forma tal que al llegar a él una perturbación sinusoidal, la lámina vibra, variando la distancia e de la forma

$$e_t = e\,(1 - m \operatorname{sen} \omega t),$$

con lo cual la carga que toma el condensador será

$$q = CE = \frac{KSE}{4\pi e\,(1 - m \operatorname{sen} \omega t)}$$

que puede ponerse en la forma

$$q = \frac{KSE}{4\pi e}\,(1 + m \operatorname{sen} \omega t + m^2 \operatorname{sen}^2 \omega t + \ldots)$$

En los micrófonos de condensador se logra que m sea muy pequeño, y aunque en rigor, por existir todos los términos en las diversas potencias de sen ωt, ya podemos decir que el sistema introduce distorsión «no lineal», y existen todos los armónicos, éstos suelen tener amplitudes despreciables, y podemos poner:

$$q = \frac{KSE}{4\pi e}\,(1 + m \operatorname{sen} \omega t).$$

Esta carga q se compone de un término constante que es la carga que toma el condensador en reposo (ausencia de señal acústica):

$$q_o = \frac{KSE}{4\pi e},$$

y del término sinusoidal que modifica la carga instantánea, cuando llega una perturbación.

El potencial instantáneo a que está cargado el condensador será

$$V = E(1 + m \operatorname{sen} \omega t).$$

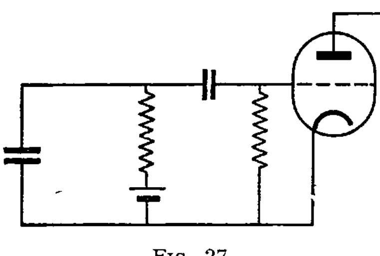
Esta variación de tensión — resultado de la variación de carga — originará una corriente sinusoidal en la resistencia R, y la tensión engendrada en ella por dicha causa es la señal útil que después se lleva a un amplificador.

Se debe observar que el sistema eléctrico de este micrófono no introduce distorsión lineal de amplitud, que el micrófono será tanto más sensible cuanto mayor sea E; sin embargo, E no puede crecer excesivamente: debe tenerse muy presente la tensión disruptiva del condensador. También aumentaremos la sensibilidad haciendo R grande, que igualmente no puede hacerse excesivamente grande, pues entonces la tensión de ruidos engendrados en ella por efecto Niquist produciría una relación señal-ruido poco elevada.

Para los micrófonos corrientes de condensador se suelen tener los valores que a continuación se detallan:

$m = 2{,}5 \cdot 10^{-6}$ para la presión de una baria:
$E = 200$ voltios.
$R = 4$ a 6 megohmios.

Acoplamiento de micrófonos electrostáticos. Los micrófonos de este tipo se acoplan de la forma que se indica en la figura 27. Como dan un nivel de salida muy bajo, es preciso colocar muy cerca el amplificador, y si éste no tiene un paso «previo» amplificador en tensión, es indispensable ponérselo. Los cables de conexión entre micrófono y amplificador deben ser lo más cortos posible dentro de las exigencias del usuario del micrófono (unos 6 metros como máximo) y deben estar perfectamente apantallados, ya que los ruidos que pudieran inducirse en ellos podrían tener un nivel comparable a la señal del micrófono y serían amplificados al mismo tiempo que la señal. Existe otra modalidad de micrófonos electrostáticos consistente en variar la capacidad del condensador actuando sobre el dieléctrico, de modo que bajo las presiones acústicas sufriese variación la densidad del dieléctrico.


FIG. 27

En este caso, las láminas no vibran y se eliminan los inconvenientes inherentes a esa vibración; sin embargo, no son muy utilizados todavía estos micrófonos.

Micrófono electrostático «Western Electric». Este micrófono, muy utilizado, posee un diafragma de duraluminio suficientemente tenso para que tenga una frecuencia propia por encima de los 6000 ciclos. La otra armadura del condensador (fig. 28) tiene una serie de ranuras longitudinales, y el espacio entre ambas está en comunicación con un recipiente o depósito, estando llenos ambos espacios de hidrógeno.

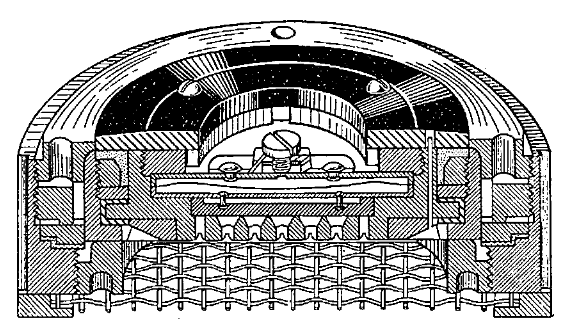


FIG. 28

Cuando varía la presión atmosférica se deformaría el diafragma y variaría la sensibilidad del aparato, pero de esta forma se encuentra una cierta resistencia debida al aumento de presión que sufre la masa de hidrógeno; sin embargo, conviene que la pared de la camareta recipiente no sea indeformable, y por ello se hace de una substancia plástica con goma. La masa de hidrógeno que queda entre las armaduras es regulada por una especie de válvula que existe entre este espacio y el recipiente depósito. Dicha válvula no ofrece resistencia a las bruscas variaciones de presión debidas a las vibraciones del diafragma, pero se opone a las variaciones lentas debidas, por ejemplo, a los cambios de presión atmosférica.

Micrófonos electrodinámicos. Utiliza este tipo de micrófono la propiedad de que cuando un conductor se mueve en un campo magnético, produciéndose, por tanto, variación de flujo abrazado, se crea en él una fuerza electromotriz inducida.

Fundamentalmente hay dos tipos distintos, según que el conductor que se mueve sea una pequeña bobina o una cinta metálica; al primero se le denomina de bobina móvil y al segundo de cinta, que puede tener dos modalidades: de velocidad o de presión.

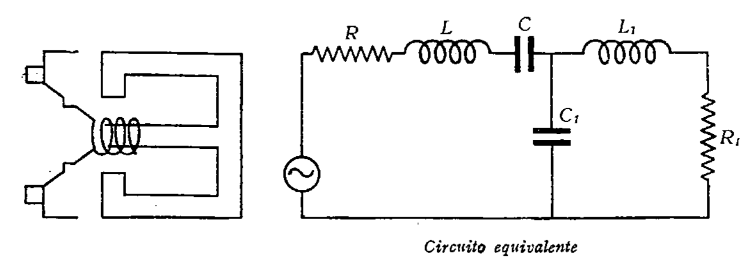
Micrófono de bobina móvil. Está constituído (fig. 28 bis) por un potente imán permanente o electroimán (suele ser siempre un imán permanente convenientemente tratado y envejecido artificialmente para que el micrófono no sufra variaciones de sensibilidad), entre cuyos polos se coloca una pieza metálica cilíndrica para producir un campo magnético uniforme radial; una ligera bobina hecha con cinta de aluminio apoyada sobre un cilindro de papel bakelizado —muy ligero—

puede desplazarse en la dirección del eje, que es el mismo del cilindro metálico, impulsado por las vibraciones que sufre un diafragma al cual está sujeta la bobina.

En estas condiciones, si es l la longitud de la bobina y H el valor de la intensidad del campo magnético debido al imán, se tendrá para el valor de la fuerza electromotriz inducida,

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Hl\frac{dx}{dt} = -Hlv.$$

v es la velocidad de desplazamiento de la membrana.



Circuito equivalente

FIG. 28 bis

Prescindiendo del signo, debido a la interpretación de Lenz, y midiendo H en gauss, l en centímetros y v en centímetros por segundo se tendrá

$$e_{\text{voltios}} = Hlv.\ 10^{-8} \quad ,,$$

Aplicando la teoría de los sistemas electromecánicos tendríamos para expresión de la velocidad eficaz de la bobina,

$$V_{eff} = \frac{P_{eff}}{\sqrt{r^2 + \left(m\omega - \frac{k}{\omega}\right)^2}}$$

siendo P_{eff} el valor eficaz de la presión acústica.

En estos micrófonos se pretende que v sea independiente de la frecuencia, y para lograrlo se disponen a continuación de la bobina cavidades que llenas de aire modifican el circuito mecánico.

En la figura 28 bis se señala el esquema eléctrico equivalente al circuito mecánico.

Debe verificarse:

R resistencia eléctrica = r resistencia mecánica debida a la bobina.
L autoinducción = m masa mecánica debida a la bobina.
C capacidad = $1/k$ elasticidad mecánica debida a la bob.
R_1 resistencia = r_1 resistencia debida a la cavidad de aire.
L_1 autoinducción = m_1 masa debida a la cavidad de aire.
C_1 capacidad = $1/k_1$ elasticidad debida a la cavidad de aire,

(las elasticidades son k y k_1)

con lo cual la impedancia del conjunto eléctrico, utilizando la notación compleja, será

$$\vec{Z}_e = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) + \frac{(R_1 + jL_1\omega)\cdot\frac{1}{jC_1\omega}}{R_1 + j\left(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}\right)} =$$

$$= R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) + \frac{\left(\frac{R_1}{jC_1\omega} + \frac{L_1}{C_1}\right)\left[R_1 - j\left(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}\right)\right]}{R_1^2 + \left(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}\right)^2}$$

pasando a la impedancia mecánica después de sustituir las constantes de equivalencia:

$$\vec{Z}_M = \overbrace{r + \frac{r_1 m_1 k_1 - \frac{r_1 k_1}{\omega}\left(m_1\omega - \frac{k_1}{\omega}\right)}{r_1^2 + \left(m_1\omega - \frac{k_1}{\omega}\right)^2}}^{A} +$$

$$+ j\overbrace{\left[m\omega - \frac{k}{\omega} - \frac{\frac{r_1^2 k_1}{\omega} + m_1 k_1\left[m_1\omega - \frac{k_1}{\omega}\right]}{r_1^2 + \left(m_1\omega - \frac{k_1}{\omega}\right)^2}\right]}^{B}$$

el módulo de la impedancia valdrá

$$Z_M = \sqrt{A^2 + B^2}$$

y escogiendo convenientemente los valores de r, m, k, r_1, m_1; k_1, es decir, combinando las dimensiones y constantes mecánicas del micrófono, se puede conseguir que Z_M permanezca constante para un amplio margen de frecuencia, y, por consiguiente, V, ya que $V = P/Z_M$.

De acuerdo con esto, la curva de respuesta será plana en un ancho margen (fig. 29), pues $e = Hlv$.

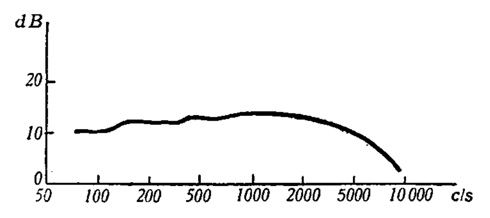


FIG. 29. Curva relativa de respuesta de un micrófono electrodinámico de bobina móvil

Se obtienen micrófonos electrodinámicos con respuesta casi idéntica para una gama de 40 a 10 000 c/s. Este tipo de micro presenta muy baja impedancia, por lo cual, para adaptarlo a la entrada de la primera válvula del amplificador se ponen transformadores de relaciones hasta de 1 a 100, con lo cual, aunque su sensibi-

lidad absoluta es del orden de 10^{-4} voltios/baria, entregan a la rejilla del «previo» del amplificador 10^{-2} voltios/baria (fig. 30).

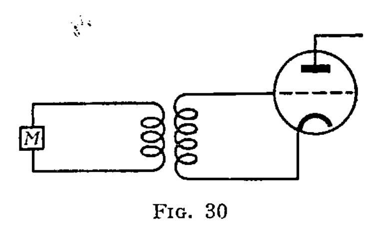


FIG. 30

Micrófono de cinta (velocidad). Está constituído por una cinta de aluminio de unas 4 micras de espesor y 1 cm. de ancha y 4 ó 5 de larga, con ondulaciones, cinta que cuelga entre las piezas polares de un imán. El dispositivo es, como se ve, de tipo electrodinámico, estando sustituída la bobina por la cinta. Debido a las variaciones de presión a que está sometida una de las caras de la cinta, ésta se halla sometida a una fuerza

$$F = a \cdot b \, (\Delta P_1 - \Delta P_2)$$

(fig. 31).

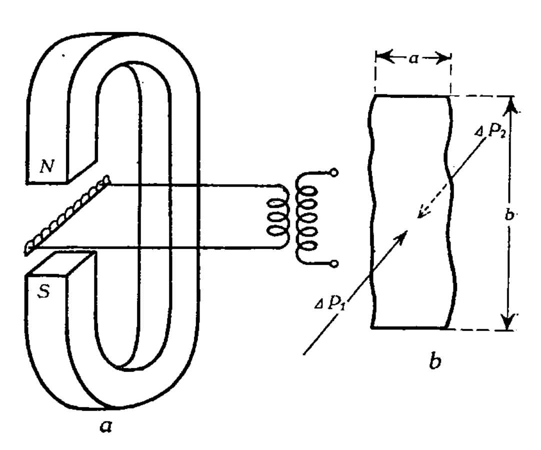


FIG. 31. *a*, esquema teórico de micrófono de cinta; *b*, forma de la cinta

La impedancia mecánica está en este caso formada por una resistencia (que vale exclusivamente lo que el efecto de resistencia de radiación le comunica al sistema), no habiendo componente reactiva apreciable porque no existe elasticidad, ya que no se tensa la cinta y la masa es casi nula. Al no existir componente reactiva, la impedancia es independiente de la frecuencia y, por tanto, la curva de respuesta es una paralela al eje de frecuencias (fig. 32). La sensibilidad de estos micrófonos es del orden de $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ voltios/baria, y su impedancia es también lo suficientemente baja para necesitar transformador de adaptación de relaciones 1-50 ó 1-100.

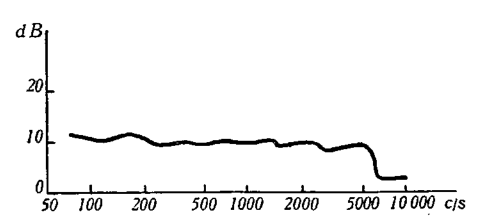


FIG. 32. Curva relativa de respuesta de un micrófono de cinta (gradiente de presión, «velocidad»)

El verdadero nombre de este micrófono debía ser de aceleración o gradiente de presión.

Micrófono de presión. Aunque más adelante trataremos de la direccionalidad de los micrófonos, podemos ya decir que el de «aceleración» es muy direccional, lo que a

veces es un gran inconveniente, y así se dispone una modalidad de los micrófonos de cinta, en la cual se bloquea la parte posterior de la cinta para que no lleguen a ella las variaciones de presión, y de esta forma sólo es activa una de sus caras. Este tipo se llama de «presión», y prácticamente no es direccional.

Micrófono piezoeléctrico. Piezoelectricidad. El fenómeno de la piezoelectricidad, descubierto en 1880 por Curie, consiste en la propiedad que tienen algunos cuerpos cristalinos de dar polarizaciones eléctricas cuando son solicitados por fuerzas mecánicas en direcciones determinadas. El fenómeno es recíproco, y así, al aplicar una diferencia de tensión entre dos caras del cristal éste se deforma mecánicamente, y si la tensión es alterna, el cristal entra en vibración a esa frecuencia.

Si tallamos un cristal de cuarzo (fig. 33) y de él cortamos a su vez una lámina de dimensiones a sobre el eje óptico ZZ, b sobre el eje piezoeléctrico YY y c sobre el eje eléctrico XX, se observan los siguientes fenómenos:

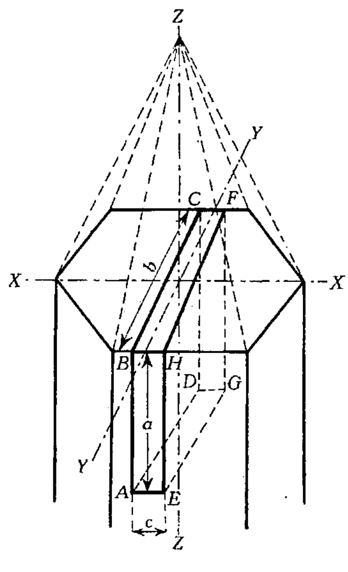


Fig. 33

1.° Si comprimimos el cristal según el eje eléctrico, normalmente a las caras $ABCD$ y $EFGH$, se obtiene sobre estas caras una cantidad de electricidad $q = F \cdot K$, en que F es el valor de la fuerza aplicada y K la constante piezoeléctrica, cuyo valor para el cuarzo es 2,3 $\mu\mu$. La carga q cambia de signo cuando se produce una tracción en lugar de una compresión sobre el cristal.

2.° Si se actúa con una fuerza F de compresión normalmente a las caras $ABEH$, según la dirección del eje YY piezoeléctrico se obtiene también cargas eléctricas en las caras del caso primero, pero de valor

$$q = - FK \cdot c/b.$$

Estos dos fenómenos se llaman piezoeléctricos directos longitudinal y transversal.

3.° Si aplicamos entre las caras $ABCD$ y $EFGH$ una diferencia de potencial, el cristal se deforma en la dirección del eje eléctrico XX una cantidad longitudinal $e = KV$, y en la dirección del eje piezoeléctrico YY una cantidad $e' = - KV \cdot c/b$.

El signo — tiene como significado que: si se mantiene una contracción sobre según XX, se produce una dilatación sobre YY, y al revés.

Este fenómeno es el piezoeléctrico inverso.

4.° No se verifica ningún fenómeno de los mencionados anteriormente si la tracción o compresión es paralela al eje óptico ZZ, o cuando la diferencia de potencial se aplica a las caras perpendiculares a dicho eje.

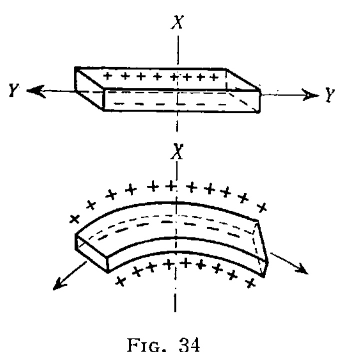


Fig. 34

Puede observarse que cuando $c/b = 10$, la carga sobre las caras perpendiculares a YY sería $F \cdot 23$.

Si un cristal es flexionado, según indica la figura 34, las caras normales al eje mecánico o piezoeléctrico quedan cargadas con cargas del mismo signo, debido a que hay a la vez tracciones y compresiones, teniendo gran importancia esta propiedad, ya que permite asociar cristales para tener un efecto más intenso.

De todos los cristales piezoeléctricos, cuarzo, turmalina, sal de Rochela, el más utilizado en la fabricación de micrófonos a cristal es la sal de Rochela (COOK-CHOH-CHOH-COON$_a$), debido a que es el que tiene una constante piezoeléctrica más elevada.

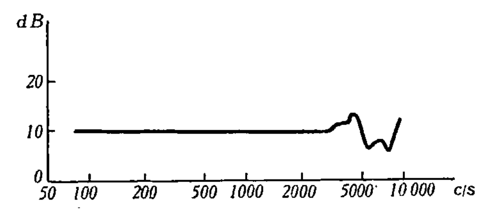


Fig. 35. Curva relativa de respuesta del micrófono a cristal Philips. Tipo 9, 529

Tiene, sin embargo, su empleo inconvenientes notables que obligan a tener gran cuidado en la construcción de estos micrófonos. Puede indicarse como inconveniente de los cristales de sal de Rochela el ser muy poco conductores del calor, lo que los hace frágiles ante los cambios bruscos de temperatura

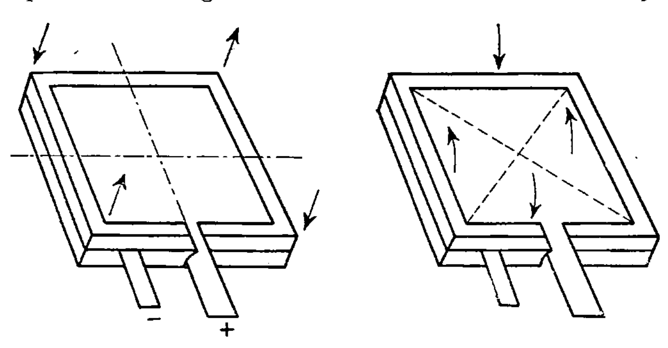


Fig. 36

(el cristal se rompe si es sometido a una variación rápida); también varía la sensibilidad con la temperatura, y sobre todo debe preverse

que por ser el tartrato sódicopotásico soluble en agua, si el micrófono está en una atmósfera húmeda y no se hubieran tomado precauciones,

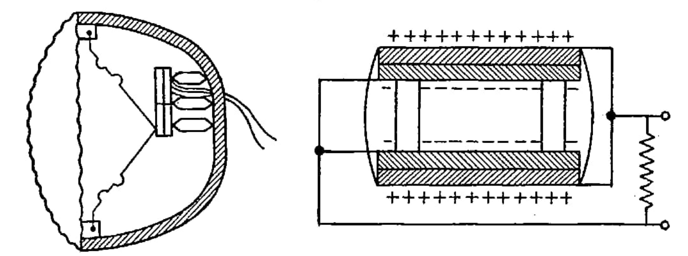


FIG. 37. Esquema teórico de un micrófono a cristal utilizando dos pares de cristales

se destruiría por disolverse el cristal. Los micrófonos de cristal son fieles a todas las frecuencias, pero tienen muy poca sensibilidad (fig. 35).

Un elemento piezoeléctrico con destino a ser utilizado en un micrófono está formado por dos plaquitas de cristal convenientemente talladas que se pegan entre sí. Las caras opuestas se cubren con unas láminas metálicas flexibles que hacen de electrodos. Estos elementos, llamados dimorfos, pueden obtenerse en dos formas distintas, según como se corten los cristales, y así se señalan los casos *a)* y *b)* de la figura 36, donde se indica por medio de flechas las direcciones en que deben hacerse las presiones para que la tensión recogida sea máxima. Las caras de las plaquitas se hacen corresponder de modo que las caras externas tienen la misma polaridad, y las dos internas que están en contacto también la misma, de signo contrario.



FIG. 38. Aspecto de un micrófono de cristal de sobre mesa

Los micrófonos de «cristal» pueden ser de dos tipos distintos, según la forma en que actúa la onda acústica sobre los elementos dimorfos: serán de acción directa y de diafragma. Los primeros están formados por una o varias células que se unen en serie o paralelo para tener un aumento de sensibilidad y sobre las cuales actúa el sonido directamente; en los segundos se

emplea una sola célula, pero ésta se dispone de tal modo que apoyada por tres vértices de una cara a la caja soporte, queda el otro vértice de la cara opuesta a un diafragma. De este modo se aumenta mucho la sensibilidad, pero no son tan fieles y son algo direccionales. En la figura 37 se observa el esquema de principio de un micrófono del segundo tipo.

Todos estos micrófonos tienen una gran impedancia, lo que les permite ser unidos directamente a la rejilla de la válvula del «previo», teniendo ésta normalmente una resistencia de escape de rejilla de unos 3 ó 4 megohmios.

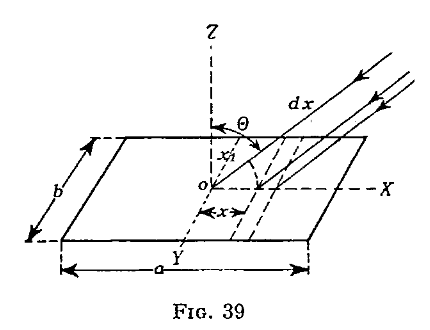


Fig. 39

Los modelos que se encuentran corrientemente, y en los que se disponen 12 pares de cristales montados en series paralelas, tienen sensibilidades del orden de —50 dB respecto del nivel cero de 1 miliwatio.

Directividad de los micrófonos. La respuesta de un micrófono depende de su orientación respecto de la dirección del campo acústico creado por el manantial perturbador. Si trazamos las curvas que representan la respuesta tomando coordenadas polares en que el parámetro sea el ángulo que determina la posición relativa de micrófono y foco, obtendremos las curvas o diagramas de directividad.

Las partes activas de los micrófonos estudiados, son de forma rectangular o circular; conviene analizar matemáticamente el problema para sacar las consecuencias correspondientes.

Primer caso. Sea la membrana del micrófono de forma rectangular (fig. 39) y dimensiones a y b. Una onda cuya dirección forma un ángulo θ con el eje Z llega a la membrana. Si llamamos P_o sen ωt a la presión acústica en el origen 0, se tendrá, que la fuerza que actúa sobre el rectángulo elemental de área

$$dS = b \cdot dx \quad ,,$$

será

$$dF = P_o \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x_1}{v_1}\right) b \cdot dx = b\, P_o \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x \cos \theta}{v_1}\right) dx,$$

y sobre toda la membrana:

$$F = P_o\, b \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x \cos \theta}{v_1}\right) dx =$$

$$= P_o\, ab \, \frac{\operatorname{sen}\left(\dfrac{a\pi \operatorname{sen} \theta}{\lambda}\right)}{\dfrac{a\pi \operatorname{sen} \theta}{\lambda}} \operatorname{sen} \omega t \qquad (51)$$

la dependencia de F con θ nos dará la directividad. Se puede observar que si a es despreciable al lado de la longitud de onda de la señal,

$$\frac{\operatorname{sen} \dfrac{a\pi \operatorname{sen} \theta}{\lambda}}{\dfrac{a\pi \operatorname{sen} \theta}{\lambda}}$$

tiende a la unidad, y F será independiente de la orientación, es decir, tendremos un micrófono cuya sensibilidad no varía con la orientación y será omnidireccional. Un ejemplo es el micrófono de cristal en el

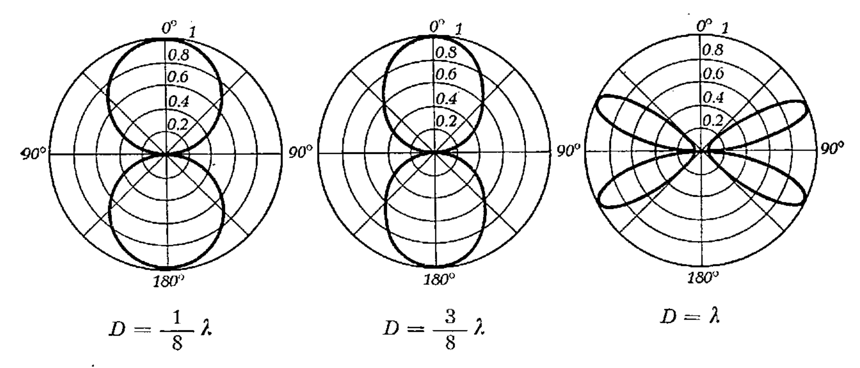


FIG. 40. Características de directividad de un micrófono de «gradiente de presión», según la relación entre la longitud de onda y el diámetro

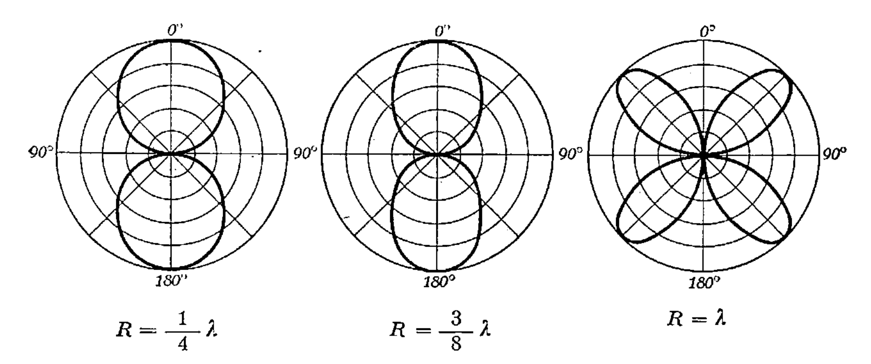


FIG. 41. Característica de directividad de un micrófono de cinta en pantalla circular cuyo radio guarda una relación con la longitud de onda

cual se emplean células de sal de Rochela de unos 5 ó 6 mm de lado, y aún para frecuencias de 10 000 c/s a los que corresponde una longitud de onda de 34 cm, se cumple la condición anterior y es un caso típico de micrófono omnidireccional.

Segundo caso. Hay micrófonos cuya parte activa es casi rectangular, pero debido a su especial funcionamiento (véase micrófonos de cinta) debe introducirse en la fórmula de la presión, que sólo en ellos actúa, el término cos θ, y así se demuestra bien claro como aparece la directividad peculiar en ellos.

En las figuras 40 y 41 se indican las curvas de respuesta de un micrófono de gradiente de presión y de cinta respectivamente para diversas frecuencias.

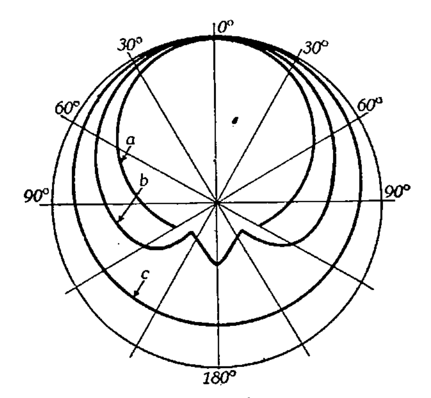


FIG. 42.
a) curva de respuesta a 6000 c/s
b) » de » a 4000 c/s
c) » de » a 2000 c/s
de un micrófono de gradiente de presión

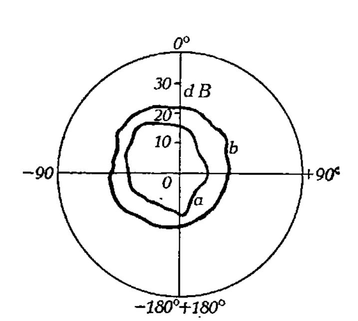


FIG. 43.
Curva de directividad de un micrófono de carbón: curva *a* a 1000 c/s; curva *b* a 5000 c/s

Tercer caso. Si la membrana es circular y de radio R, se puede obtener, siguiendo un proceso idéntico al del caso primero, que

$$F = 2\,P_0\,\pi\,R^2\,\frac{J_1\left(\dfrac{2\pi R \operatorname{sen}\theta}{\lambda}\right)}{\dfrac{2\pi R \operatorname{sen}\theta}{\lambda}}\,, \qquad (52)$$

siendo J_1 la función de Bessel de primer grado y primera especie.

Como consecuencia de la observación de la fracción de la fórmula (52) se puede deducir que en este caso las características de directividad son distintas para diversas frecuencias y que solamente se permitirá un valor máximo del ángulo de orientación θ para una distorsión lineal de amplitud prefijada.

Ejemplo de este caso es el micrófono de bobina móvil (electrodinámico) y aun el de carbón de doble cápsula.

En la figura 42 se indica la característica de direccionalidad de un micrófono electrodinámico a hilo móvil.

En la figura 43 la de uno de carbón.

Combinando las acciones de dos micrófonos se pueden obtener curvas de directividad adecuadas; así, sumando la acción de uno omni-

direccional y otro bidireccional, según se ve en la figura 44, se puede obtener uno unidireccional:

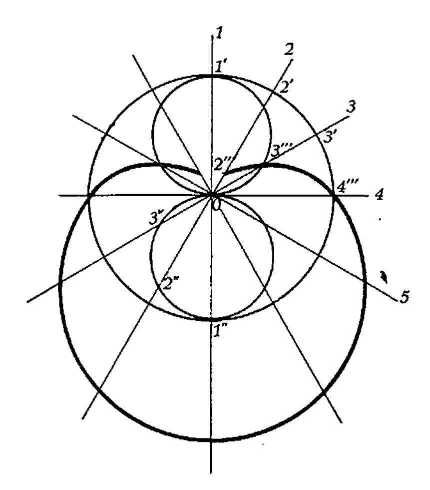


FIG. 44. «Combinación de diagramas directivos para tener otra directividad distinta»

Los micrófonos modernos suelen estar preparados de forma que por medio de un conmutador se pueden variar sus diagramas de directividad según convenga.

Capítulo V

Altavoces

Generalidades. Se llama altavoz al dispositivo capaz de transformar la energía eléctrica en acústica, y con la suficiente intensidad para que se pueda oír a cierta distancia.

Existen muchos tipos de altavoces, cada uno de los cuales utiliza un principio físico distinto, pero también pueden clasificarse atendiendo a otras características: tales como las de peculiaridades de cada uno de los órganos fundamentales que componen el altavoz, y que son:

a) «Motor» u órgano que transforma la energía eléctrica en mecánica.

b) Órgano mecánico.

c) Órgano acústico.

d) Dispositivos para acoplamientos con el medio externo.

Atendiendo al apartado *a*) se pueden clasificar en:

1.° *Electromagnéticos:* el principio de funcionamiento en las acciones mutuas entre imanes.

2.° *Electrostáticos:* se fundan en la fuerza atractiva entre las armaduras de un condensador, que es modificada con la tensión de la señal.

3.° *Electrodinámicos:* fundados en las acciones entre imanes y corrientes.

4.° *Piezoeléctricos:* se emplea la propiedad piezoeléctrica inversa, de las substancias especiales que la poseen, como la sal de Rochela y el cuarzo.

5.° *Magnetoestricción:* aprovechan el fenómeno de ese nombre, que consiste en la alteración molecular sufrida por determinados cuerpos cuando varía su estado magnético.

6.° Térmicos.

Los de las clases quinta y sexta no se construyen, y sólo los hemos mencionado a título de información. Los de la clase cuarta son delicados, y, desde luego, de poca potencia, cosa que también sucede a los de condensador.

Los magnéticos se emplean más que todos los anteriores, pero en realidad el altavoz más comúnmente utilizado es el electrodinámico.

Atendiendo al apartado *b*), pueden ser:
1.° De hierro móvil.
2.° De bobina móvil.

Considerando el sistema acústico:
1.° De membrana metálica empotrada.
2.° De membrana cónica de cartón, etc.

Por último, atendiendo al apartado *d*) se clasifican:
1.° De cono directo.
2.° De bocina (de varias clases, según el tipo de ella).

Altavoces electromagnéticos no equilibrados. Los altavoces electromagnéticos pueden ser: no equilibrados, o de armadura equilibrada.

Los primeros pueden combinarse con un cono o con una membrana empotrada, y así tenemos los esquemas teóricos indicados en *a*) y *b*) de la fig. 45.

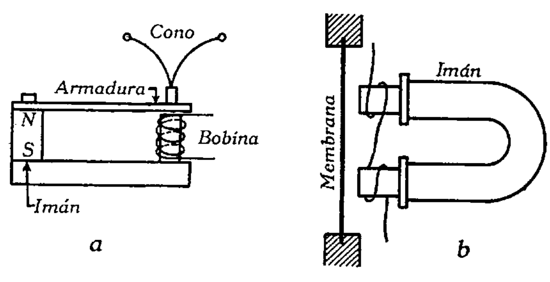


FIG. 45. *a*, «motor» de altavoz electromagnético no equilibrado con cono; *b*, caso en que el equipo mecánico es una membrana empotrada

En ambos casos se tiene un imán permanente que tiene arrollada una bobina —donde se aplica la señal eléctrica que proviene del amplificador—, y una armadura móvil que forma parte del circuito magnético y que puede desplazarse siguiendo las variaciones del flujo magnético existente. Los desplazamientos de esta armadura obligan a vibrar al cono.

En la otra versión de este tipo de altavoz, las líneas de fuerza se cierran por la membrana y ésta varía de posición, siendo atraída o repelida.

Sea Φ_1 el flujo que atraviesa la armadura en reposo, y Φ_2 sen ωt el flujo variable debido a la fuerza magnetomotriz que crea la corriente sinusoidal

$$i = I \text{ sen } \omega t$$

que atraviesa la bobina.

La fuerza instantánea que actúa sobre la armadura será

$$f = \frac{(\Phi_1 + \Phi_2 \text{ sen } \omega t)^2}{8 \pi S} \quad ,, \qquad (53)$$

siendo S la sección del núcleo; en el caso *b* de la figura 45, debe ponerse $2S$, por ser el entrehierro doble.

Desarrollando (53), se tendrá

$$f = \frac{1}{8\pi S}\left[\Phi_1^2 + 2\,\Phi_1\,\Phi_2 \text{ sen } \omega t + \frac{1}{2}\,\Phi_2^2 - \frac{1}{2}\,\Phi_2^2 \cos 2\,\omega t\right] \quad ,, \qquad (54)$$

Cuando hablamos de un imán permanente podíamos considerar que ese flujo permanente existente en el reposo está producido por un electroimán que tiene una bobina excitadora, y entonces si es:

F la fuerza magnetomotriz;
R_1 la reluctancia del circuito magnético;
N el número de espiras de la bobina excitadora;
R_2 la reluctancia del circuito magnético alterno;

la (54) se transforma en

$$f = \frac{F^2}{8\pi R_1^2 S} + \frac{FNI \text{ sen } \omega t}{R_1 R_2 S} + \frac{\pi N^2 I^2}{R_2^2 S} - \frac{\pi N^2 I^2 \cos 2\omega t}{R_2^2 S}. \quad (55)$$

Podemos observar que con objeto de que no haya distorsión «no lineal» interesa que el último término de la fórmula (55) sea despreciable al lado del segundo, lo cual sólo se puede conseguir cuando Φ_2 sea mucho menor que Φ_1; es decir, en reposo, el flujo debe tener un valor apreciable.

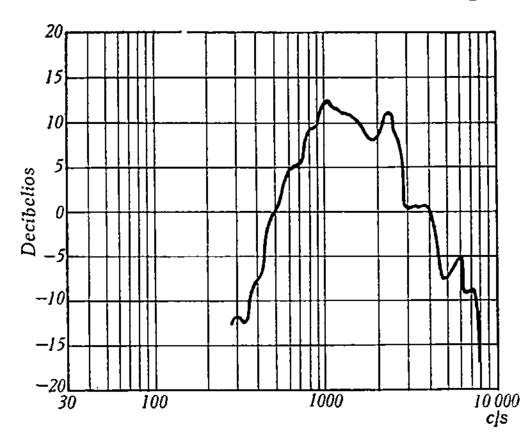


FIG. 46. Curva de respuesta de un altavoz electromagnético no equilibrado de tipo bipolar

Respecto a la curva de respuesta de los altavoces de este tipo, podemos decir que es mala. En la figura 46 se observa la característica de uno bipolar equilibrado, donde solamente puede ser aceptada la respuesta entre 400 y 4000 c/s. Llamando l a la longitud del circuito magnético, se tendrá

$$\Phi_1 = \frac{F}{\frac{l}{S}} = \frac{F S}{l}$$

La fuerza electromotriz inducida en la bobina debida a la variación de este flujo por variar l (se mueve la armadura), es

$$e = -N \frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{2 FS}{l^2} \cdot \frac{dx}{dt},$$

ya que la variación de longitud es a uno y otro lado de la posición de reposo.

De la (55), haciendo igual a f' el segundo sumando, se puede deducir

$$i = \frac{f' R_1 R_2 S}{FN}$$

siendo i la intensidad instantánea y f' el incremento de fuerza debido a esa acción.

Dividiendo se obtiene

$$Z_{EM} = e/i = \frac{2\,F^2 N^2}{R_1\,R_2\,l^2} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{f'}$$

y como

$$\frac{dx}{dt}$$

es la velocidad de desplazamiento de la armadura, y la impedancia mecánica es

$$Z_M = \frac{f'}{v}$$

podemos poner

$$Z_D = \frac{2\,F^2\,N^2}{R_1\,R_2\,l^2\,Z_M}$$

que se llama impedancia mocional ó dinámica, según ya dijimos.

Si R_1 fuese igual a R_2, $Z_D = \frac{2\,\Phi_1^2\,N^2}{l^2\,Z_M}$

La impedancia eléctrica total que se ofrece a la señal será

$$Z_E = E/I = R_E + \frac{2\,\Phi_1^2\,N^2}{l^2\,Z_M}$$

en la que R_E es la resistencia óhmica de la bobina. Como se ve, por el hecho de moverse la bobina se aumenta la impedancia eléctrica que en reposo de la bobina no sería más que la resistencia R_E, pues su autoinducción es despreciable.

Altavoces magnéticos equilibrados. El funcionamiento de estos altavoces se basa en el mismo principio físico que los anteriores; sin embargo, el tener compensada la variación del flujo magnético da origen a que esta modalidad ofrezca ventajas sobre el anterior tipo. La armadura (fig. 47) puede ser ahora más ligera teniendo menor reluctancia el circuito magnético.

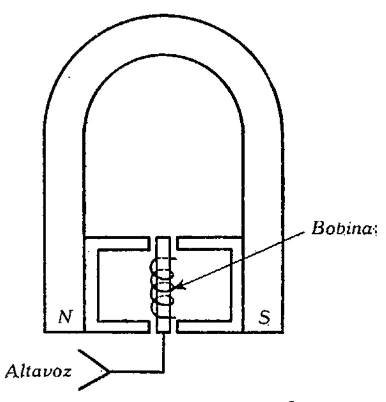


FIG. 47. «Esquema de altavoz magnético equilibrado»

Utilizando la misma nomenclatura que en el párrafo anterior, y viendo que debido a las direcciones de los flujos en cada extremo de la armadura actúan fuerzas de modo que la total será

$$f = \frac{2\,(\Phi_1 + \Phi_2)^2}{8\,\pi\,S} - \frac{2\,(\Phi_1 - \Phi_2)^2}{8\,\pi\,S} = \frac{\Phi_1\,\Phi_2}{\pi\,S}$$

y como $$\Phi_2 = \frac{4\pi NI \text{ sen } \omega t}{R},$$

se tendrá $$f = \frac{4\Phi_1 NI \text{ sen } \omega t}{RS}$$

En este caso, la impedancia dinámica vale

$$Z_D = \frac{e}{i} = \frac{-N\dfrac{d\Phi}{dt}}{\dfrac{FRS}{4\Phi_1 N}} = \frac{4F\Phi_1 N^2}{R_2 l^2 Z_M} = \frac{4\Phi_1^2 N^2}{l^2 Z_M}$$

justamente de valor doble que en el caso del altavoz equilibrado. Vemos que se ha conseguido aumentar esta impedancia, lo cual es una ventaja, según volveremos a indicar cuando tratemos más detenidamente esta cuestión al estudiar el altavoz electrodinámico de bobina móvil.

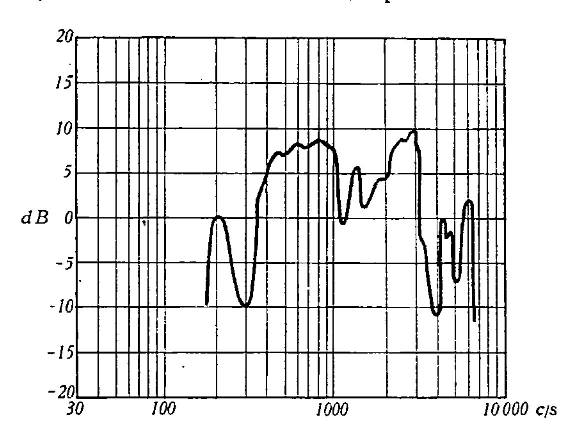


Fig. 48. Curva de respuesta de un altavoz electromagnético equilibrado

La parte mecánica consiste en un vástago unido a la armadura en cuyo extremo se fija el vértice de un cono de cartón fijo por sus bordes.

La curva de respuesta de un altavoz de este tipo se puede observar en la figura 48.

Altavoz electrostático. En la figura 49 se puede ver el esquema de principio. Cuando no se aplica ninguna señal entre A y B, las armaduras están atraídas por una fuerza

$$f' = \frac{V^2}{8\pi e^2}$$

C' es un condensador para bloquear la tensión V de polarización y que ofrece una impedancia despreciable a las señales que excitan el altavoz.

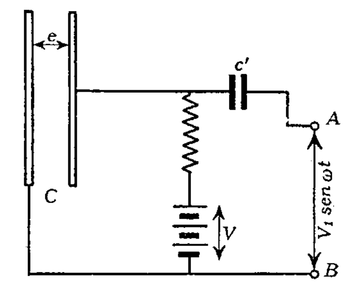


Fig. 49. Esquema teórico de circuito de altavoz electrostático con su alimentación

Si llegase una de esas señales, f' se transformaría en

$$f = \frac{(V + V_1 \text{ sen } \omega t)^2}{8 \pi e^2} =$$

$$= \frac{V^2 + 2 VV_1 \text{ sen } \omega t + \frac{1}{2} V_1^2 - \frac{1}{2} V_1^2 \cos 2 \omega t}{8 \pi e^2}$$

y si pretendemos que no haya distorsión «no lineal»

$$V \gg V_1,$$

y la componente moduladora de la fuerza será

$$f_M = \frac{VV_1 \text{ sen } \omega t}{4 \pi e^2} \quad ,, \tag{56}$$

En el cálculo de la impedancia utilizamos

$$i = \frac{dq}{dt} = V \frac{dC}{dt} = V \frac{dC}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \tag{57}$$

y como el condensador es plano, si lo suponemos de superficie S y dieléctrico aire:

$$C = \frac{S}{4 \pi e} \quad ,, \quad \frac{dC}{dx} = -\frac{S}{4 \pi e^2}$$

con lo cual la (57) queda en la forma

$$i = -\frac{VS}{4 \pi e^2} \cdot \frac{dx}{dt}$$

De la (56) se deduce:

$$V_1 \text{ sen } \omega t = v_i = \frac{f_M 4 \pi e^2}{V}$$

luego
$$Z_D = \frac{v_i}{i} = -\frac{16 \pi^2 e^4}{V^2} \cdot Z_M \quad ,,$$

puesto que
$$Z_M = \frac{f_M}{\frac{dx}{dt}}$$

Altavoces electrodinámicos. Son los altavoces empleados más corrientemente y en todo género de aplicaciones.

Como todos, constan de «motor», órgano mecánico, etc.

El tipo normal de altavoz electrodinámico es el del bobina móvil, cuyo esquema de principio se ve en la figura 50.

Un fuerte imán permanente o un electroimán crea un campo permanente de forma radial en un entrehierro anular; por este espacio puede desplazarse una pequeña bobina cilíndrica venciendo la tensión de una pieza elástica que tiende a centrarla.

Si llamamos:

D al diámetro de una espira de la bobina.

i a la intensidad que circula por ella.

N al número de espiras de la misma.

H a la intensidad del campo magnético producido por el imán o electroimán, se tendrá, como expresión de la fuerza a que está sometida la bobina,

$$f = \pi D N H i = l i H, \qquad (58)$$

llamando l a la longitud total de hilo que se ha devanado en la bobina. Atendiendo a esa fuerza que variará con i, la bobina se desplaza arrastrando en su movimiento al cono C, que vibra, produciéndose las perturbaciones acústicas oportunas.

Fig. 50. Esquema de altavoz electrodinámico de bobina

Podemos ya deducir que para tener altavoces potentes será preciso tener excitaciones intensas que produzcan campos H de alto valor.

La f.e.m. inducida en la bobina por el hecho de desplazarse en un campo magnético, es

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = H l v \quad ,, \qquad (59)$$

y utilizando (58) y (59)

$$Z_D = \frac{e}{i} = H^2 l^2 \frac{v}{f} = \frac{H^2 l^2}{Z_M}$$

siendo, por tanto, $H^2 l^2$ el factor electromecánico de conversión.

La impedancia eléctrica que se ofrece a la señal E cuando la bobina y el cono se mueven, es

$$Z_E = R_E + \frac{H^2 l^2}{Z_M};$$

como ya hemos dicho, R_E es la resistencia óhmica de la bobina, y no tenemos en cuenta el efecto reactivo de su autoinducción por ser despreciable.

La impedancia dinámica tiene una componente resistiva y otra reactiva, ya que Z_M tiene esas dos componentes:

$$\frac{H^2 l^2}{Z_M} = R_D + jX_D;$$

a R_D se le llama resistencia eléctrica de radiación, y $R_D I^2$ será la parte de energía eléctrica que se transfiere al sistema vibrador. Convendrá, por tanto, que tenga un alto valor.

Al hablar de la reacción del medio sobre los radiadores, dijimos que la parte reactiva de la impedancia mecánica significa un aumento de

masa. Se demuestra que los valores de la resistencia mecánica de radiación e incremento de masa valen:

$$r_R = d_o\, V_1\, a^2 \pi \left(1 - \frac{J_1\, 2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a}{2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a} \right) ,, \qquad (60)$$

$$m_i = d_o\, v_1\, a^2 \frac{v_1}{\omega} \left(\frac{H_1\, 2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a}{2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a} \right) ,, \qquad (61)$$

ecuaciones que se obtienen asimilando el cono de cartón utilizado en estos altavoces a un disco rígido de radio a, que vibra en pantalla acústica infinita.

En las expresiones (60) y (61), J_1 es la función de Bessel de primer grado y primera especie, y H_1 la de Struve de primer orden.

Sustituyendo esas expresiones por sus desarrollos en serie equivalente, se tendrá:

$$r_R = d_o\, v_1\, \pi\, a^2 \left[\frac{\left(2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a\right)^2}{1 \cdot 2} - \frac{\left(2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a\right)^4}{1 \cdot 2^2 \cdot 3} + \frac{\left(2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a\right)^6}{1 \cdot 2^2 \cdot 3^2 \cdot 4} \cdots \right] ,, \ (62)$$

$$m_i = d_o\, v_1\, \pi \frac{a^2}{\omega} \left[\frac{4}{\pi} \cdot \frac{2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a}{1 \cdot 3} - \frac{\left(2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a\right)^3}{1 \cdot 3^2 \cdot 5} + \frac{\left(2 \dfrac{\pi}{\lambda}\, a\right)^5}{1 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} \cdots \right] ,, \ (63)$$

Se puede ver en las curvas de la figura 51 que para valores pequeños de $\dfrac{2\pi}{\lambda}\, a$ en la curva (1) —que representa el paréntesis de (62)— ese factor vale aproximadamente $\dfrac{\left(\dfrac{2\pi a}{\lambda}\right)^2}{2}$. Para el valor particular de $\dfrac{2\pi}{\lambda}\, a = 2$, el paréntesis vale la unidad, y para valores superiores hace una serie de pequeñas oscilaciones.

En la curva —2— se ve la variación del paréntesis de (63) ,, para $\dfrac{2\pi a}{\lambda} \simeq 0{,}5$ vale la unidad, pero crece hasta su máximo — 1,38 — para seguir oscilando después al mismo tiempo que decrece.

El rendimiento de este altavoz será

$$\eta = \frac{R_D}{R_E + R_D} = \frac{1}{1 + \dfrac{R_D}{R_E}} ,, \qquad (64)$$

como la potencia $R_D\, I^2$ es la que se transfiere al aire en forma acús-

tica salvo una pequeña pérdida por calor a causa de la fricción en el cono y en sus suspensiones, interesará que R_D sea grande y que r_R evidentemente también lo sea.

Ya que R_D es la parte real de $\frac{H^2 l^2}{Z_M}$ interesará que el campo magnético sea intenso.

A primera vista parece conveniente aumentar la longitud, pero al mismo tiempo crecería R_E y, por tanto, se produciría pérdida grande de potencia por efecto Joule en la bobina, y también aumentaría la reactancia mecánica por ser mayor la masa en movimiento.

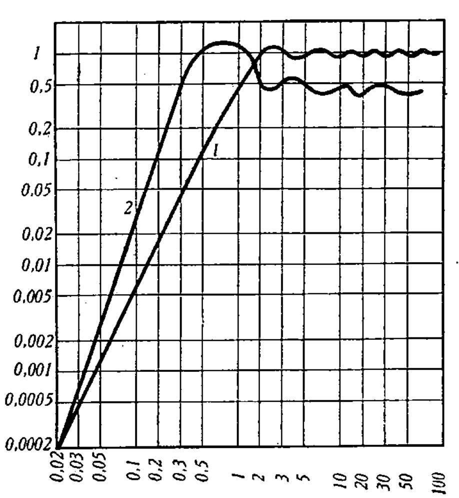


FIG. 51. Variación de la resistencia mecánica en función de $\frac{2\pi}{\lambda}$ a de radiación y del incremento de masa

El aumento en la sección del hilo disminuye R_E, pero hace grande la masa de la bobina, y por ser necesario un entrehierro mayor, disminuye H, por lo cual no es esto una solución.

Planteando el problema matemáticamente, se deduce que la masa óptima que debe tener la bobina móvil varía con la frecuencia, por lo cual hay que llegar a una solución de compromiso para tener un rendimiento medio de valor alto en un ancho margen de frecuencias acústicas.

Respuesta de los altavoces electrodinámicos. Se puede ver que la respuesta de un altavoz que tiene como único radiador el cono de papel es aproximadamente plana entre la frecuencia de resonancia del sistema mecánico y aquella especial en que la longitud de onda es igual a dos veces el diámetro. Como consecuencia de esto podemos sacar diversas consecuencias interesantes; éstas son:

Los altavoces de cono pequeño (de radio pequeño) tienen alta la frecuencia límite de la banda plana que hemos indicado, o sea, que si se quieren reproducir tonos agudos se deben emplear altavoces cuyo cono sea de radio pequeño.

Parece a primera vista que el rendimiento de los altavoces irá disminuyendo rápidamente con el radio del cono, ya que la resistencia de radiación es proporcional a la cuarta potencia de dicho radio; sin embargo, como al mismo tiempo disminuye la masa — la de la bobina móvil que lo mueve — y, por tanto, R_E, es posible obtener altavoces pequeños con rendimiento normal. Lo que sí es imposible es conseguir radiar grandes potencias con altavoces pequeños; podíamos ver que si dos altavoces de radios r y $2r$ radian la misma potencia, la

velocidad de vibración del cono del primero será cuatro veces mayor que en el otro, y como la velocidad es igual a la amplitud de la vibración multiplicada por su pulsación, resultaría que para bajas frecuencias las amplitudes tendrían que ser enormes si se quieren radiar potencias apreciables.

En la figura 52 pueden verse las amplitudes de varios discos (caso a que se asimila un cono) en función de la frecuencia de vibración y para un watio de potencia radiada.

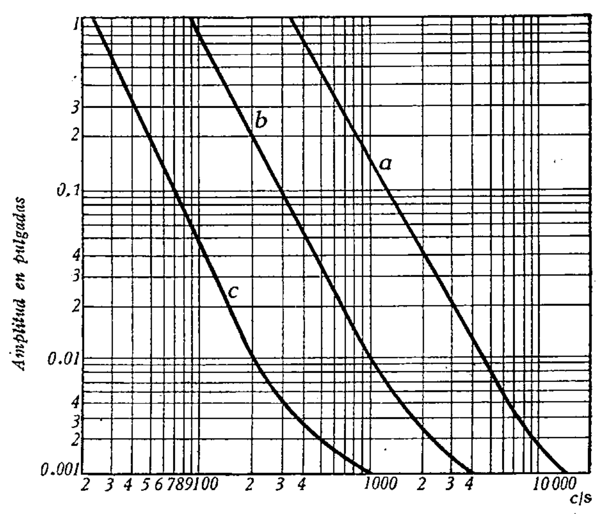


Fig. 52. Amplitud de las vibraciones de un disco en pantalla acústica infinita (un cono puede asimilarse a este caso) en función de la frecuencia, y para caso de radiarse 1 watio. *a*, disco de diámetro 1 pulgada; *b*, disco de diámetro 4 pulgadas; *c*, disco de diámetro 16 pulgadas

Con objeto de que la respuesta a las bajas frecuencias sea buena es preciso bajar la frecuencia de resonancia mecánica, y como el peso y dimensiones del cono vienen fijados por otras cuestiones, actuaremos sobre las suspensiones haciéndolas elásticas. Se ha esbozado la dificultad que supone el tener respuestas uniformes en amplias gamas; para resolver el problema pueden darse dos soluciones que iremos tratando sucesivamente.

Primera solución. Utilizar un altavoz grande para los graves y uno de cono pequeño para los tonos agudos.

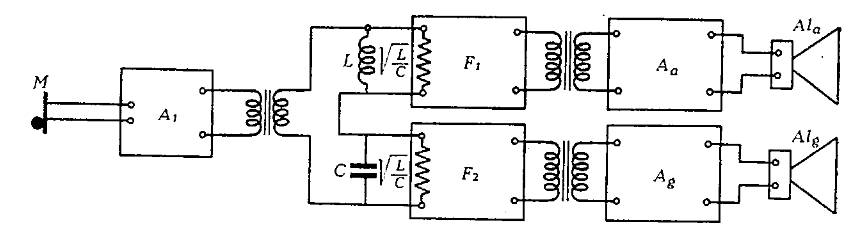


Fig. 53. Instalación amplificadora con altavoces para graves y agudos

Se divide entonces el espectro de frecuencias en dos partes, asignando la reproducción de cada una de ellas o cada altavoz. Esta solución requiere el separar ambas gamas a la salida del amplificador por

medio de circuitos filtro. En la figura 53 señalamos el esquema teórico de una instalación de amplificadores, con altavoces de graves y agudos.

M es el micrófono y A_1 el amplificador; a su salida vienen dos células: la superior deja pasar las notas agudas y la inferior las bajas frecuencias. A continuación vienen otros amplificadores especialmente diseñados que favorecen dichas frecuencias y cuyas

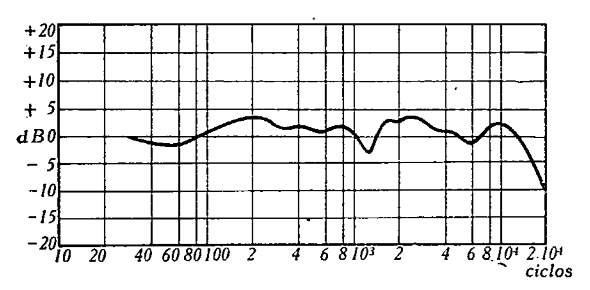
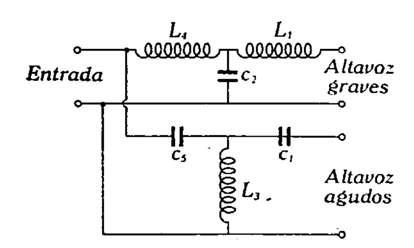
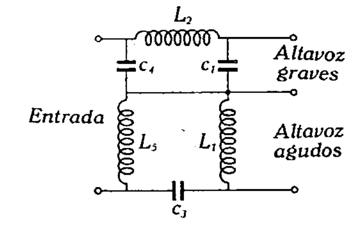
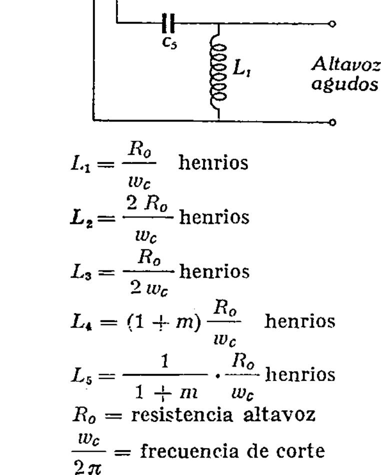
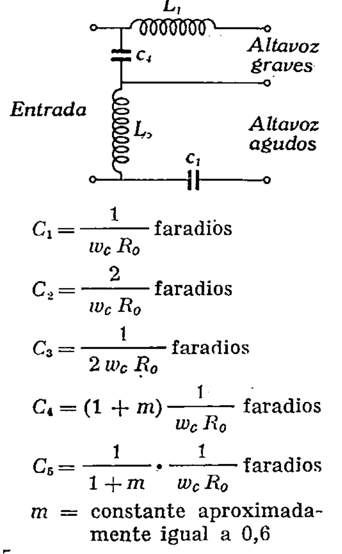


FIG. 54. Respuesta del conjunto de altavoces de la instalación









$L_1 = \dfrac{R_o}{w_c}$ henrios

$L_2 = \dfrac{2\,R_o}{w_c}$ henrios

$L_3 = \dfrac{R_o}{2\,w_c}$ henrios

$L_4 = (1 + m)\dfrac{R_o}{w_c}$ henrios

$L_5 = \dfrac{1}{1 + m} \cdot \dfrac{R_o}{w_c}$ henrios

R_o = resistencia altavoz

$\dfrac{w_c}{2\pi}$ = frecuencia de corte

$C_1 = \dfrac{1}{w_c\,R_o}$ faradios

$C_2 = \dfrac{2}{w_c\,R_o}$ faradios

$C_3 = \dfrac{1}{2\,w_c\,R_o}$ faradios

$C_4 = (1 + m)\dfrac{1}{w_c\,R_o}$ faradios

$C_5 = \dfrac{1}{1 + m} \cdot \dfrac{1}{w_c\,R_o}$ faradios

m = constante aproximadamente igual a 0,6

FIG. 55

salidas van adosadas a cada altavoz especial. En la figura 54 se indica la curva de respuesta del conjunto anterior, que es sumamente buena.

Otras veces el divisor de frecuencias se dispone de forma distinta; en la figura 55 se dan los circuitos prácticos que se utilizan más corrientemente.

En todos ellos llamamos a la impedancia de entrada R_0.

Segunda solución. A veces se recurre a tener un número suficiente de altavoces pequeños de forma que entre todos puedan disipar la potencia que entrega el amplificador.

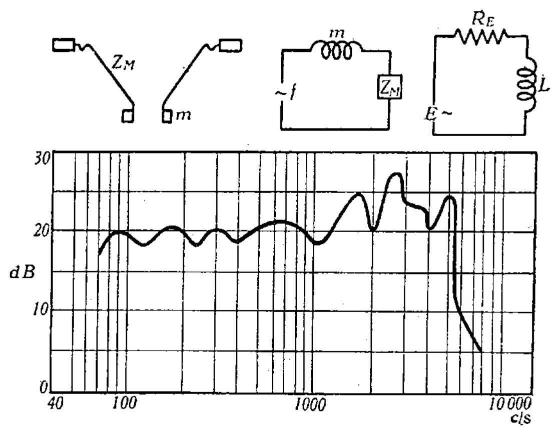


FIG. 56. Circuito eléctrico, mecánico y curva de respuesta de un altavoz de bobina y cono únicos

Esto se hace porque los altavoces cuyo cono es de muy pequeño radio, tienen curvas de respuesta muy planas y anchas. Se puede conseguir ampliar el margen de frecuencias en que se considera uniforme la respuesta de un altavoz, recurriendo a otros procedimientos.

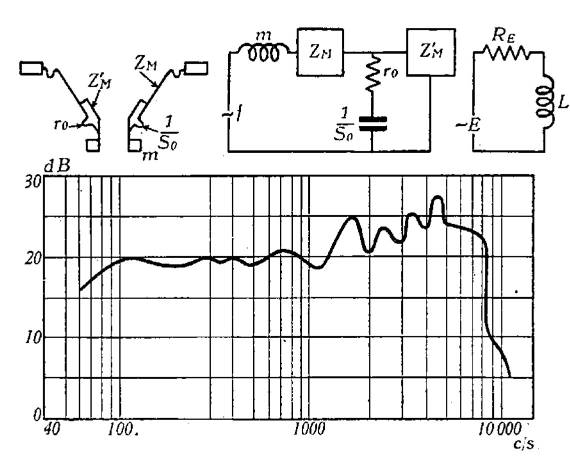


FIG. 57. Circuito eléctrico, mecánico y curva de respuesta de un altavoz de doble cono y bobina única

Pueden diseñarse aparatos que tienen doble cono y doble bobina, combinándose las cuatro posibilidades:

a) *Cono único*, una sola bobina móvil.

b) *Doble cono*, una sola bobina móvil.

c) *Cono único*, doble bobina móvil.

d) *Doble cono*, doble bobina móvil.

Además, a los conos se les hace una especie de ondulaciones según secciones crecientes del mismo, lo que supone introducir en los circuitos mecánicos una resistencia mecánica e inversa de elasticidad (los textos americanos la llaman compliancia) en paralelo.

Caso a) En la figura 56 se da la curva de respuesta de un altavoz de cono único y una sola bobina móvil. En los circuitos equivalentes el significado es:

E, tensión eléctrica aplicada a la bobina móvil.
R_E, resistencia óhmica de la bobina móvil.
L, autoinducción de la bobina móvil.
f, fuerza vibromotriz aplicada al equipo móvil.
m, masa de la bobina.
Z_M, impedancia mecánica.

Podemos observar que en este caso, a partir de la frecuencia de 5000 c/s, el rendimiento del altavoz se bajísimo.

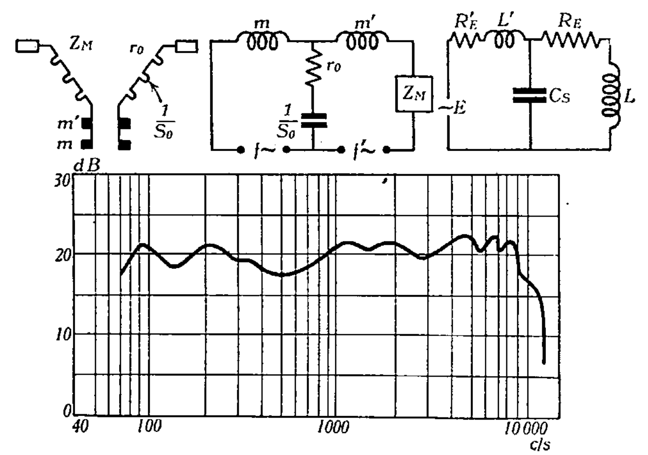


FIG. 58. Circuito eléctrico, mecánico y curva de respuesta de un altavoz de cono sencillo y doble bobina

Caso b) En la figura 57 se considera el caso de un altavoz de doble cono y una sola bobina móvil. También debe fijarse la atención en la ondulación que tiene el cono grande y cuya resistencia mecánica y elasticidad son respectivamente r_o y S_o.

Es fácil ver que la respuesta se ha hecho más extensa y plana.

Caso c) En este caso (fig. 58) las dos bobinas se encuentran unidas por medio de un enlace elástico, lo que supone que se introduzca en el circuito eléctrico la capacidad C_s en paralelo.

A baja frecuencia, C_s ofrece una gran reactancia, y casi toda la corriente que produce la señal, circula por la bobina *m*. También puede decirse que la otra bobina es arrastrada en el movimiento de la primera como si fuese una sola unidad. A altas frecuencias, C_s es despreciable y casi toda la corriente circula por la bobina *m'*, con lo cual el sistema funciona como si se tuviesen dos altavoces independientes.

Por último, en la figura 59 se tiene el caso de doble cono y doble bobina, con lo cual se extiende todavía más la gama.

Directividad. Desde el momento que dijimos que un altavoz de radiación directa puede considerarse equivalente a un pistón vibrando en pantalla acústica infinita, se comprende que al igual que allí la energía acústica no se enviará omnidireccionalmente al espacio, sino que este dispositivo tendrá una característica de direccionalidad bien determinada por la relación

$$\frac{P_\theta}{P} = \frac{2\,J_1\left(\dfrac{2\,\pi}{\lambda}\,R\ \text{sen}\ \theta\right)}{\dfrac{2\,\pi}{\lambda}\,R\ \text{sen}\ \theta}$$

siendo P_θ la presión creada por el altavoz en un punto que forma un ángulo θ con la dirección del eje del cono. P es la presión en un punto situado en ese eje y a la misma distancia que el anterior.

J_1 es la función de Bessel de primer grado y primera especie.

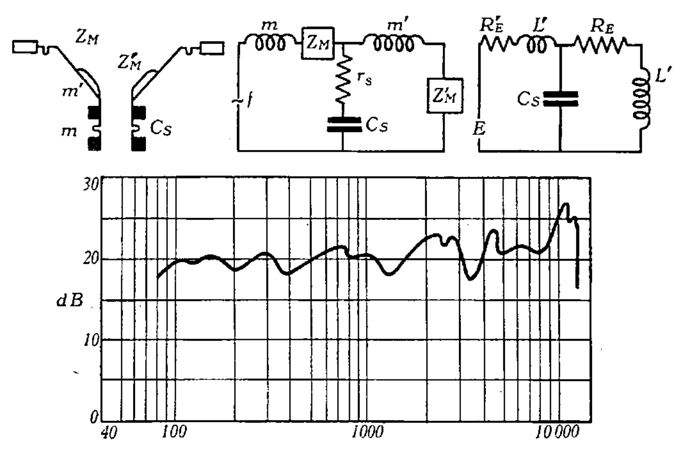


FIG. 59. Circuito eléctrico, mecánico y curva de respuesta de un altavoz de cono y bobina dobles

En la figura 14 se dieron las curvas de directividad del pistón que sirven para este caso. Debe tenerse presente que, a medida que crece la frecuencia — para un mismo cono —, el altavoz se hace más directivo.

A veces, con objeto de mejorar la distribución de los agudos en una amplia zona, se emplean «difusores», consistentes en unas aletas colocadas en la abertura del cono; otras veces se utiliza como difusor un cono de madera u otro material, concéntrico con el del altavoz y de ángulo en el vértice unas diez veces menor.

Altavoces con bocina. Cuando se quiere disponer instalaciones para megafonía, entendiéndose por ello servir programas acústicos a multitudes, se plantean determinados problemas, entre los cuales

es de los más interesantes el conseguir altavoces en los que se pueda disipar una gran potencia y tengan directividades muy acusadas. Esto se consigue con los altavoces con bocina, que pueden ser especiales, cuyo vibrador es una membrana, o simplemente a los de cono si se les adosa una bocina generalmente exponencial.

Los altavoces de este tipo tienen dos nuevos órganos con respecto a los ya descritos, que son:

La cámara de compresión y la bocina.

Aunque la bocina puede ser de diversos tipos, según consideramos al tratar esta cuestión en el capítulo correspondiente, en la mayoría de los casos se utilizan bocinas exponenciales.

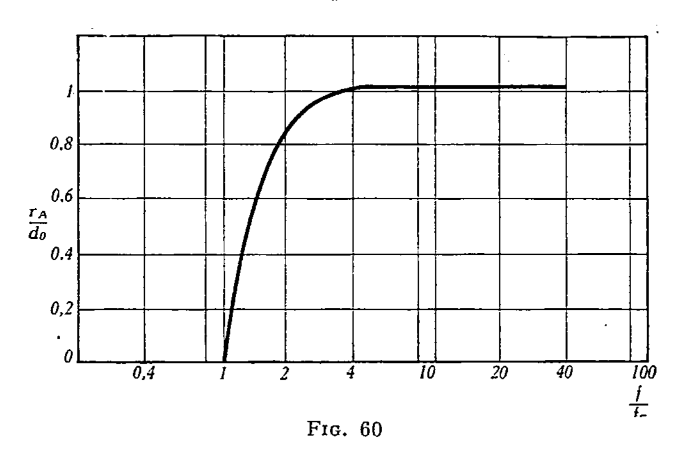


Fig. 60

Atendiendo a la fórmula (49) y a la parte real de la (47), que constituye la resistencia acústica que ofrece la carga del aire se vería que podríamos representar la función $\frac{r_A}{d_o}$ en función de $\frac{f}{f_c}$, siendo fc la frecuencia de corte, según se ve en la figura 60.

La resistencia, a partir de la frecuencia de corte, crece rapidísimamente tendiendo a uno, y la impedancia teóricamente permanece constante.

En la práctica no ocurre esto porque las bocinas no son indefinidas, sino finitas, y en la figura 61 se presentan las variaciones de impedancia con la frecuencia para diversas bocinas finitas a diámetros variables y longitudes constantes. El diámetro del cuello también es constante e igual a 1 cm, y la frecuencia de corte 100 c/s (H. F. Olson).

Se deduce de la observación de las anteriores curvas que a medida que crece el diámetro de la boca de la bocina la variación de impedancia es menor.

Cámara de compresión. Se denomina así a una cavidad colocada entre el diafragma y el cuello de la bocina.

Sabemos que la resistencia debida a la carga del aire se refleja en el cuello de la bocina, valiendo r/S_o, siendo r la resistencia por unidad de superficie. Si dispusiéramos el diafragma, también de superficie S_o, (fig. 62), en el cuello, la resistencia sobre dicho diafragma no sería ade-

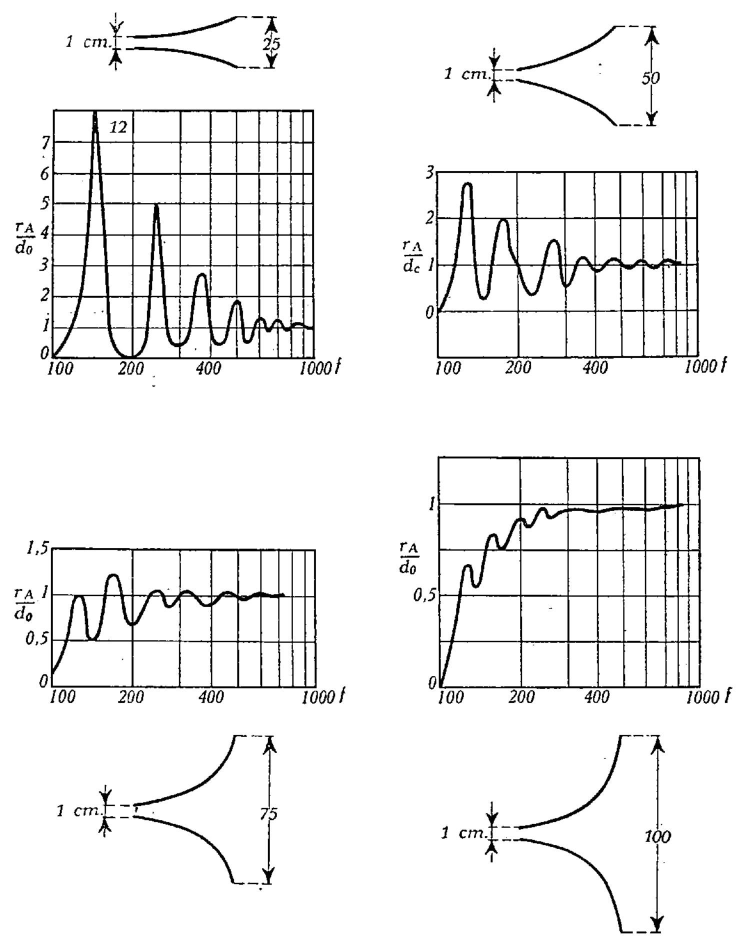


Fig. 61. Variación de la impedancia de radiación en función de la frecuencia, para distintas bocinas exponenciales

cuada si se quisiera tener un altavoz de gran potencia y que trasmitiese una gama amplia, ya que en las bajas frecuencias sería muy grande la amplitud de vibración del diafragma.

La cámara de compresión tiene el papel de adaptador de impedancias.

Se demuestra el funcionamiento de la cámara compresión, como transformador, haciendo las siguientes hipótesis:

a) El aire que llena la cámara de compresión es incompresible.

b) Idealmente se considera cerrado el cuello de la bocina por una superficie (pistón ficticio) rígida, sin masa, ni elasticidad.

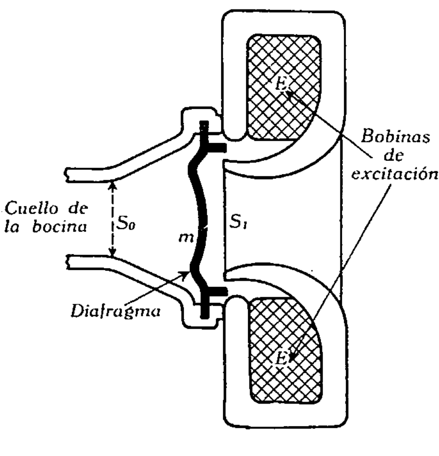


Fig. 62

Según esto, si llamamos:

S_1 a la superficie del diafragma;

S_0 a la superficie del cuello de la bocina;

a_1 al desplazamiento de S_1 al vibrar;

a_0 al desplazamiento del pistón ficticio en el cuello, se debe verificar por la indicación *a*):

$$a_1 S_1 = a_0 S_0;$$

pero si se radia una nota de pulsación ω:

$\left.\begin{matrix} u_1 = \omega\, a_1 \\ u_0 = \omega\, a_0 \end{matrix}\right\}$ siendo u_0 y u_1 las velocidades de desplazamiento, con lo que $u_1 S_1 = u_0 S_0$; pero llamando ΔP al incremento de presión que actúa sobre el cuello de la bocina, se verifica:

$$\Delta P = \frac{u_0 (r S_0)}{S_0} = u_0 r = r \frac{u_1 S_1}{S_0}$$

Y, por último,

$$Z_1 = \frac{\Delta P\, S_1}{u_1} = r \frac{S_1^2}{S_0} = Z_0 \left(\frac{S_1}{S_0}\right)^2 \qquad (65)$$

Existe una circunstancia que permite justificar prácticamente la hipótesis de incompresibilidad del aire dentro de la cámara, y es que a cualquier punto del cuello de la bocina las ondas acústicas causadas por cualquier elemento del vibrador llegan en «concordancia de fase».

A pesar de todo, la compresibilidad del aire existe, e impone una carga capacitiva al diafragma disminuyendo la carga reactiva de tipo inductivo producida por la masa de la bocina. Esto tiene gran interés, pues merced a ello puede imaginarse el rendimiento y respuesta del altavoz.

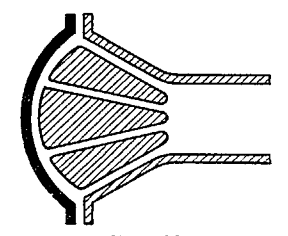


Fig. 63
«Cámara de compresión»

Para conseguirlo será necesario que las dimensiones de la cámara sean muy pequeñas comparadas con la longitud de onda del sonido producido. Con este objeto se diseñan las cámaras de compresión, según se ve en la figura 63, haciendo el diafrag-

ma en forma de casquete esférico y colocando una pieza horadada por canales que hace que sean iguales las distancias.

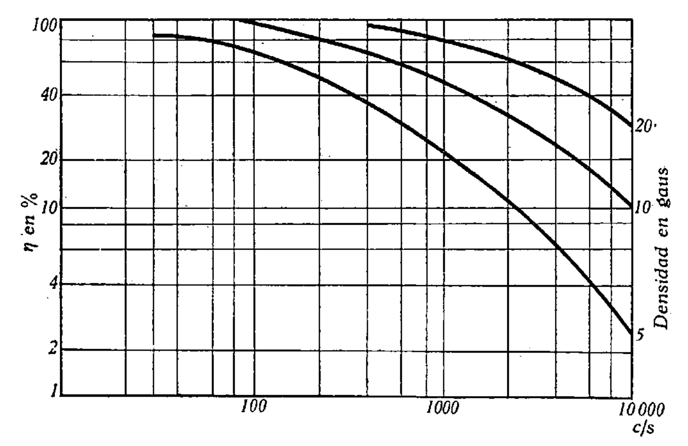


Fig. 64. Rendimiento de un altavoz de bocina en función de la frecuencia y de la densidad de flujo en el entrehierro

Pantallas acústicas. Aunque al estudiar el altavoz de radiación directa consideramos el cono como un pistón que vibra en una pan-

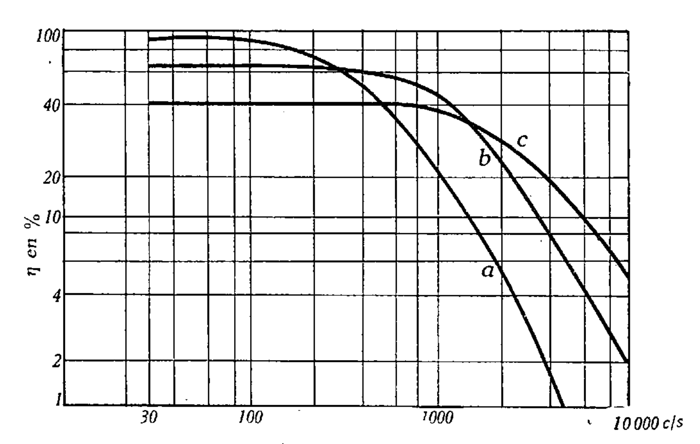


Fig. 65. Rendimiento de un altavoz de bocina en función de la frecuencia: *a*, para su superficie en la sección de la garganta de 300 cm²; *b*, para su superficie en la sección de la garganta de 50 cm²; *c*, para su superficie en la sección de la garganta de 15 cm²

talla acústica infinita, en la práctica no es así, sino que la pantalla suele ser solamente un tablero de madera de dimensiones más o menos grandes pero finitas.

Es necesario colocar pantallas (BAFFLES), pues si no, como delante y detrás del radiador se producen las ondas acústicas en oposición de fase, la señal es un punto cualquiera, sería la suma de las ondas produciéndose una interferencia que puede dar origen a una anulación total del sonido.

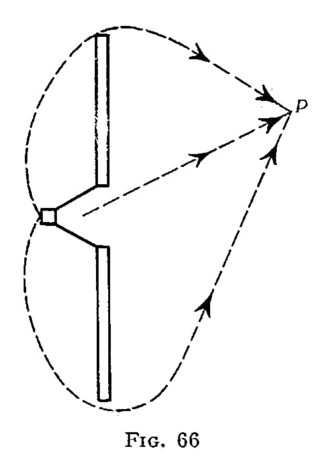


FIG. 66

Colocando un «baffle», se obliga a una de las ondas a recorrer un camino suplementario (fig. 66), con lo cual el rayo indirecto produce en el punto P una señal desfasada respecto a la causada por el rayo directo y que depende de la diferencia de distancias recorridas; cuando esa diferencia sea igual a media longitud de onda, las señales llegarían en fase y existiría un reforzamiento; en los demás casos ya no se produciría un silencio absoluto. Se comprende que cuanto más baja sea la frecuencia de la señal, mayores tendrán que ser las dimensiones del «baffle», pues mayor es la longitud de onda. Y por eso las medidas de la pantalla elegida dependerán de la misma frecuencia a transmitir.

Los «baffles» modifican las curvas de respuesta de los altavoces. En las figuras 68 y 69 se ve claramente este fenómeno.

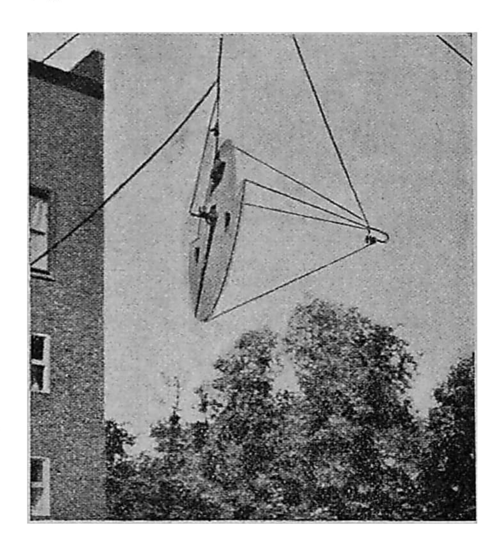


FIG. 66 bis. Disposición de un altavoz y micrófono, para medidas al aire libre sobre influencias del «baffle»

También con el empleo adecuado de «baffles» se consiguen directividades adecuadas; en la figura 70 podemos ver el efecto típico de directi-

vidad. Un procedimiento para aumentar ficticiamente las dimensiones del «baffle» es colocar el cono asimétricamente, según se ve en la figura 67. Y además de dar a dicha pantalla una forma irregular.

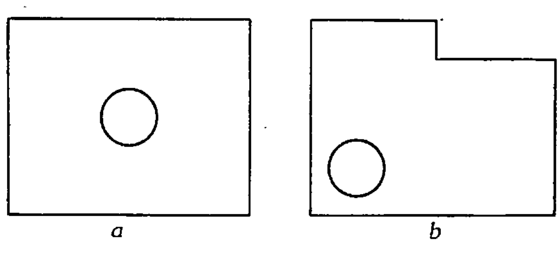


Fig. 67

Cuando el altavoz se encuentra en un local cerrado, el fenómeno no se produce según hemos dicho, pues las reflexiones de las ondas en las paredes hace que a cada punto lleguen varios rayos indirectos no habiendo nunca una interferencia total.

Altavoces multicelulares. Se emplean para conseguir efectos especiales de direccionalidad, a fin de extender uniformemente el campo acústico en zonas determinadas.

Se les dan formas muy diversas; generalmente, bocinas exponenciales, pequeñas, divergentes, cuyos extremos forman planos que contornean una superficie esférica.

Transitorios. Cuando llega al altavoz una excitación, éste no oscila instantáneamente al régimen permanente que le impondría la señal

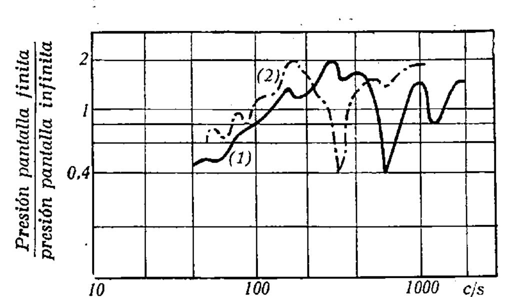


Fig. 68. Curvas de frecuencia de un altavoz con «baffle» circular: (1) micrófono colocado a 1 m; (2) micrófono colocado a 0,75 m

sinusoidal de excitación, sino que debe transcurrir un tiempo de establecimiento llamado transitorio hasta que se verifica la relación

$$V = \frac{Hli}{Z_M}$$

El intervalo de tiempo de establecimiento depende, entre otras causas, del amortiguamiento del sistema, y por analogía con los cir-

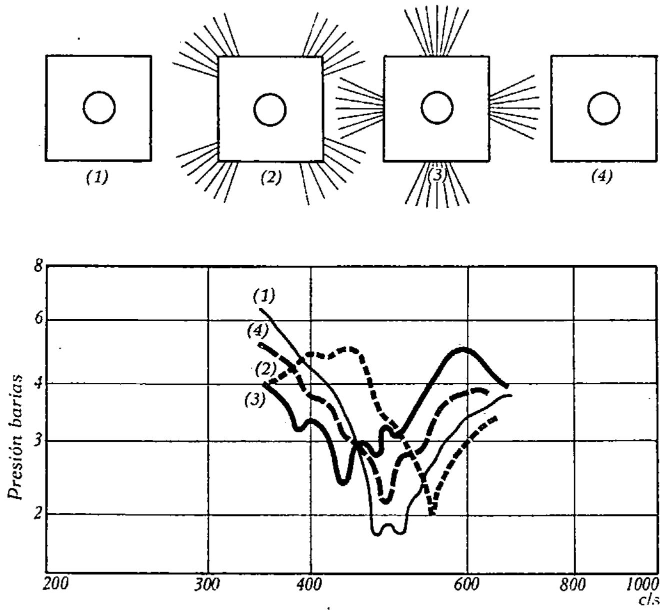


Fig. 69. Efecto causado en un altavoz por un «baffle» de forma cuadrada en las proximidades de la frecuencia crítica (las distintas formas corresponden a distinta colocación del micrófono)

cuitos eléctricos con autoinducción y resistencia, la constante de tiempo aquí dependerá de la relación entre la resistencia mecánica y la masa.

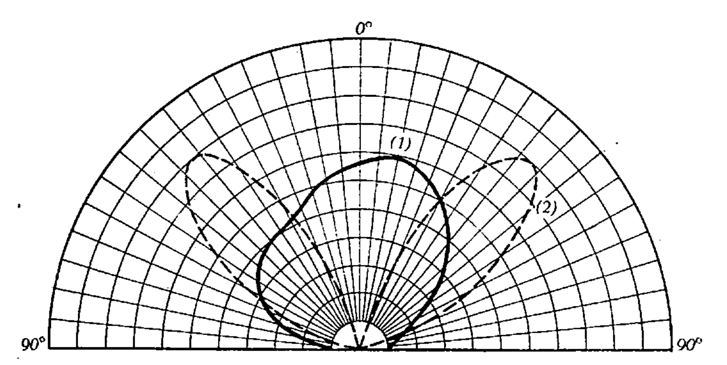


Fig. 70. Característica de directividad de un altavoz con «baffle» circular: (1), a la frecuencia de 100 c/s; (2), a la frecuencia de 500 c/s

Una solución para disminuir los transitorios es alimentar los altavoces con un amplificador de baja impedancia de salida.

Directividad de los altavoces electrodinámicos. Se puede calcular el incremento de presión producido por un cono de radio R que vibra

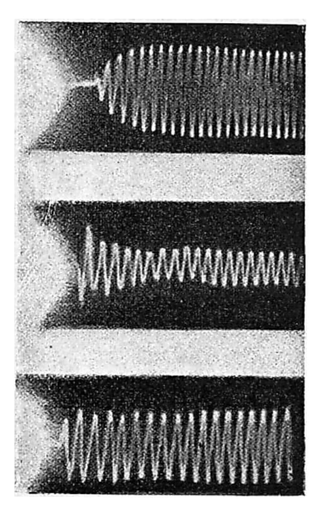


FIG. 70 bis. «Oscilogramas de diversos transitorios en altavoz»

con una velocidad de amplitud a, en un punto que diste r y formando un ángulo θ el eje del cono con la línea que lo une al punto. Ese valor es

$$\Delta P = \frac{d_o \cdot a\, R^2}{r} \cdot \frac{J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda}\, R \text{ sen } \theta\right)}{\frac{2\pi}{\lambda}\, R \text{ sen } \theta}$$

representado la función para diversas frecuencias obtendremos los diagramas de directividad de la figura 14.

Características normales de los altavoces electrodinámicos. Como de todos los altavoces mencionados los electrodinámicos son los que más se utilizan, citamos a continuación y como final del capítulo unos cuadros informativos de sus características normales:

CUADRO 3

Características normales de altavoces electrodinámicos

Potencia en audiofrecuencia en watios	Bobina móvil					Bobina de excitación					Cono	
	Número de espiras	Diámetro del hilo en mm	Resistencia en ohmios	Impedancia ohmios a 400 c/s	Impedancia ohmios a 1000 c/s	Número de espiras	Diámetro hilo en mm	Resistencia en ohmios	Tensión en voltios	Corriente en amperios	Diámetro mm	Altura mm
(a) 2,5	80	0,20	3,4	4,4	6	19 000	0,15	2500	150	0,06	170	230
(b) 2,5	80	0,20	3,4	4,4	6	30 000	0,12	7500	250	0,03	170	230
(c) 3,5	92	0,20	3,5	4,7	6,9	22 000	0,16	2500	150	0,06	170	280
(d) 3,5	92	0,20	3,5	4,7	6,9	39 000	0,13	7500	250	0,03	170	280
(e) 10	92	0,20	3,5	4,7	6,9	22 000	0,16	2500	150	0,06	280	310
(f) 10	92	0,20	3,5	4,7	6,9	39 000	0,13	7500	250	0,03	280	310
(g) 15	150	0,16	15	19	26	11 500	0,40	325	120	0,37	350	375
(h) 15	150	0,16	15	19	26	23 000	0,28	1300	250	0,18	350	375

CUADRO 4

Características normales del transformador de acoplamiento

Relación de transformación	Espiras del primario	Diámetro del hilo en mm	Espiras del secundario	Diámetro del hilo en mm	Impedancia reflejada en el primario ohmios
(a) 35/1	2 500	0,12	71	0,72	5400
(b) 35/1	2 500	0,12	71	0,72	5400
(c) 35/1	3 000	0,16	85	0,65	6500
(d) 35/1	3 000	0,16	85	0,64	6500
(e) 35/1	3 000	0,16	85	0,64	6500
(f) 35/1	3 000	0,16	85	0,64	6500
(g) 16/1	2 500	0,18	155	0,65	5000
(h) 16/1	2 500	0,18	155	0,65	5000

Sección de núcleo 2 cm².

La potencia eléctrica necesaria para crear el campo magnético de excitación, suele venir dada por la fórmula

$$W_{\text{excitación}} = 3{,}7 \sqrt{W_{\text{potencia de audiofrecuencia}}}$$

CUADRO 5

Características normales de altavoces dinámicos de imán permanente

Potencia de audiofrecuencia en watios	Diámetro del cono en mm	Diámetro máximo del imán permanente en mm	Impedancia de la bobina móvil a 1000 c/s en ohmios
3	148	74	9
6	195	74	9
9	238	110	9

SEGUNDA PARTE

CAPÍTULO I

Registro y reproducción de sonido

Generalidades. Es interesante poder registrar los sonidos para ser reproducidos después en otras condiciones. En todos está la idea de los discos gramofónicos, del registro acústico en bandas sonoras en cinematografía, así como de otras numerosas aplicaciones hoy muy en boga, como registro de conferencias, discursos, etc., para después ser archivados.

Hay muchos procedimientos de registro, pero pueden agruparse fundamentalmente en tres grupos, que son:

a) Sistemas de incisión.
b) Sistemas fotoacústicos.
c) Sistemas electromagnéticos.

En cada uno de estos grupos se incluye un cierto número de modos que iremos mencionando sucesivamente.

En todo procedimiento de registro o reproducción de sonido se utilizan cierto número de aparatos cuyo estudio entra plenamente en el dominio de la Electroacústica o de la Fotoelectricidad, y aunque ya hemos estudiado los dispositivos más fundamentales como los micrófonos y altavoces, es preciso estudiar algunos nuevos aparatos, de los cuales unos cuantos de ellos se pueden estudiar más ampliamente en otros tratados que se dedican especialmente a ellos; daremos aquí unas ideas sobre su fundamento y utilización.

Métodos de registro por incisión. Realizan la transformación de presión acústica en desplazamientos de un estilete que produce incisiones generalmente en un disco de cera o de plásticos especiales.

No vamos a tener en cuenta los primitivos métodos, puramente mecánicos, sino que consideraremos aquí los procedimientos gramofónicos, pero cuando se utilizan registradores y captadores electromecánicos.

Puede grabarse el sonido bien en un disco o sobre una superficie cilíndrica; en el primer caso, el estilete registrador recorre una espiral,

y en el segundo caso una hélice. En la actualidad sólo se utiliza el primer procedimiento, salvo en algunos aparatos comerciales que se llaman dictáfonos. Apoyándose en la espiral que sirve de guía, puede el estilete hacer incisiones bien horizontalmente o verticalmente, lo que da origen a otros dos tipos de registro gramofónico.

Los de registro lateral son más empleados, aunque a primera vista se observa que los otros permiten niveles dinámicos superiores, pues si se quisiera grabar amplitudes muy diferentes (un pianísimo y un fortísimo) en el transcurso del registro de una pieza musical y el grabado fuese horizontal, necesitaríamos discos de gran diámetro.

Los discos se graban para hacer reproducciones diferidas o para reproducir instantáneamente. No tenemos en cuenta las grabaciones en discos para cinematografía sonora, porque ya no se utilizan estos procedimientos en cine, como no sea al mismo tiempo que la grabación fotoeléctrica en la película y para que sirva de control de las escenas tomadas sin necesidad de esperar a realizar las operaciones fotográficas de laboratorio que requiere el otro sistema.

Los métodos generales son el «directo» e «indirecto». En el primero se emplean discos generalmente de aluminio con una capa de celulosa sobre la cual raya el estilete metálico o de zafiro movido por un sistema electromagnético que constituye la cabeza de grabado. Inmediatamente pueden ser reproducidos estos discos. Se emplean muchos equipos portátiles que tienen un gira-discos, una cabeza de grabación, otra de reproducción, un amplificador, un micrófono y un altavoz; con estas maletas se toman discursos y se realizan reportajes pudiendo ser reproducidos una vez terminados.

El método indirecto se emplea en la industria de discos. Se graba sobre un plato de cera blanda, obteniéndose después por medios galvanoplásticos una matriz metálica que sirve para hacer a continuación las ediciones de discos hechos con substancias plásticas, etc.

Los dispositivos de grabado o cabeza de grabado pueden diseñarse con las condiciones de «amplitud constante» o de «velocidad constante». En el primero se trazan los surcos de modo que la amplitud del mismo sea independiente de la amplitud y proporcional a la frecuencia de la señal. Teniendo en cuenta que las señales a grabar son sinusoidales o se pueden descomponer en sinusoidales y en esta clase de movimiento la velocidad es de la forma

$$v = A\,2\pi f,$$

siendo A la amplitud y f la frecuencia; si se quiere tener amplitudes de valores aceptables en las bajas frecuencias, las velocidades de desplazamiento del estilete serían enormes en las altas, lo que produciría dificultades de realización.

En el sistema de velocidad constante, la velocidad es independiente de la frecuencia y proporcional a la amplitud, ocurriendo todo lo contrario que en el caso anterior.

Para coordinar estos inconvenientes se soluciona el problema grabando los discos con dispositivos que modifican su característica, según la frecuencia, empleando el primer sistema hasta una frecuencia de «inversión» que suele ser de unos 400 c/s, y a partir de esta frecuencia se utiliza la segunda característica.

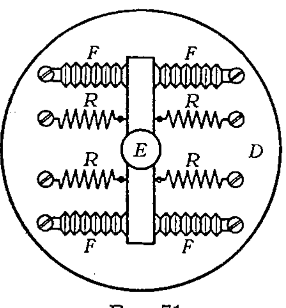


Fig. 71

Hay fundamentalmente cuatro causas que reducen la calidad de una reproducción acústica utilizando los métodos gramofónicos, sin tener en cuenta la forma de las características de respuesta que ya hemos indicado. Son muy desagradables las variaciones de velocidad de rotación del disco (wobblins), y en las instalaciones de gran calidad se emplean motores muy potentes con regulación de velocidad y de tensión, que van seguidos de engranajes muy bien calculados para conseguir la velocidad adecuada del disco. Estos motores llevan un disco de gran masa que comunica mucha inercia al sistema. Los órganos en movimiento no deben producir vibraciones mecánicas que puedan ser trasmitidas y captadas por el «pickup», ya que serían ruidos registrados. Se disponen filtros mecánicos. Las vibraciones más perjudiciales son las que podrían transmitirse al plato procedentes de los engranajes, y por eso la unión entre el eje móvil y el plato se suele hacer a través de un filtro tal como el dibujado en la figura 71. Es un disco que se fija por un lado al plato y por otro al eje E a través de resortes R y de fuelles F. Los extremos de R y F se fijan al disco D y a la banda B solidaria de E.

La velocidad de giro de los discos corrientes es de 78 a 80 revoluciones por minuto, pero los que se empleaban antiguamente en cine sonoro y en la actualidad para reportajes giran a $33 \frac{1}{3}$ r. p. m.; de esta forma se lograba que discos de 48 cm de diámetro durasen alrededor de 11 minutos, que es lo que tarda en pasarse un rollo de película de 300 m.

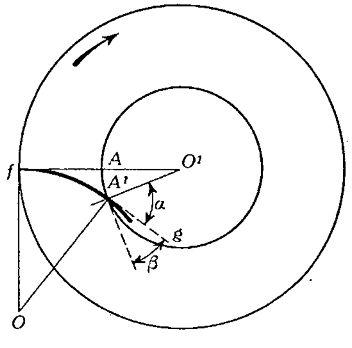


Fig. 72

«Tracking» o arrastre. El estilete del registrador se mueve en cada punto normalmente al surco o guía del disco (fig. 72); en cambio, el fonocaptor hará un arrastre peculiar de la forma en que está fijado. Si es o el punto de giro del brazo y f la punta del estilete, aunque el registrador se hubiese movido, según fA, el fonocaptor lo haría según el arco de circunferencia fA', produciéndose el arrastre de la sinusoide. Al ángulo $\beta = 90° - \alpha$ se le llama ángulo de «tracking».

Con una cuidadosa orientación del brazo del «pickup» se puede hacer despreciable el efecto de arrastre.

«Tracing». Es la distorsión causada por no ser el camino seguido por la aguja una curva idéntica a la del trazo y debido a las dimensiones finitas de surco y estilete.

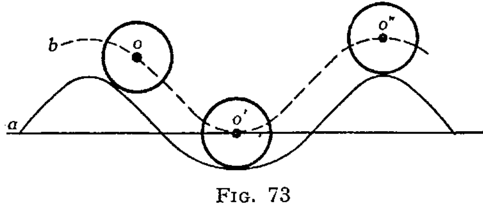


FIG. 73

En la figura 73 se ha representado el corte de un surco, supuesto hecho en un disco grabado con incisión vertical, según una sinusoide (*a* es la curva); si representamos por *o* ó *o″* tres porciones de la aguja, asimilable en su punta a una bola esférica, veremos que la curva *a* descrita no es una sinusoide, pues sus mínimos son más agudos y sus máximos más redondeados.

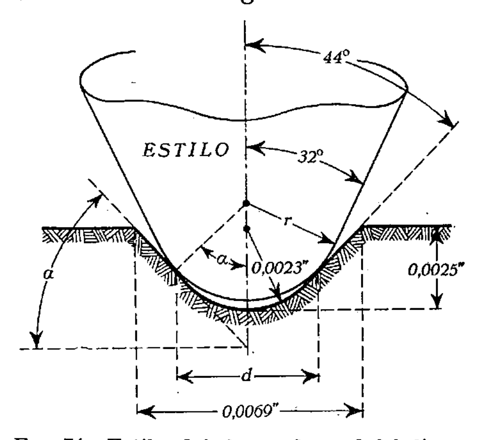


FIG. 74. Estilo alojado en el canal del disco

Ruido de aguja. En la figura 74 se representa en corte un surco y una aguja indicando sus dimensiones normales; aunque la superficie de contacto entre ranura y aguja es pequeño, como la superficie del surco no es absolutamente plana y hay pequeñísimos relieves o granulaciones, la aguja captará vibraciones extrañas que son origen de ruidos. Como veremos más adelante, las dimensiones de la aguja deben ser adecuadas y su desgaste produce reproducciones sordas y con ruidos aumentando éstos a medida que decrece la velocidad de giro. Se ve por ello que al final de los discos, que es cuando la aguja está más desgastada, la velocidad es menor y, por tanto mayor el ruido, por ello en cinematografía sonora se grababan los discos de modo que el principio era en el centro del disco y se iba desenrollando la espiral hasta el final, que coincidía con la periferia del disco.

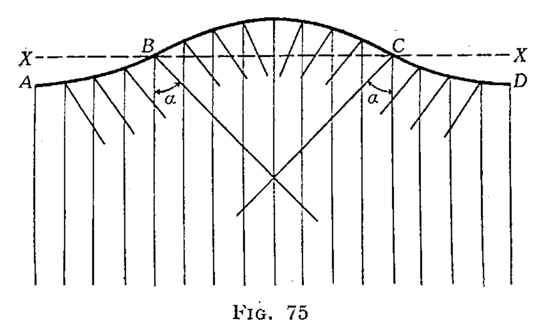


FIG. 75

Medida de la amplitud de la velocidad. Es muy interesante medir la amplitud de la velocidad de desplazamiento del estilete, y G. BUCHMANN y E. MEYER publicaron en 1930 un método óptico para reali-

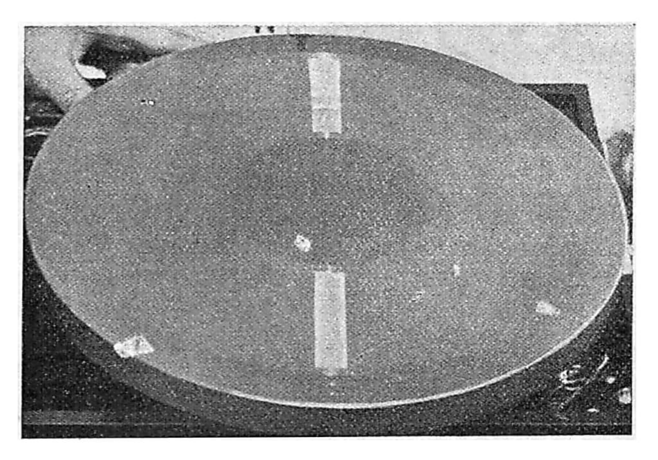


FIG. 76. Registro con una señal de la misma frecuencia y amplitud

zar esta medida. En la figura 75 se observa el procedimiento de principio del método: la curva $ABCD$ representa una incisión hecha en un surco cuya guía es el eje xx'; un haz de rayos luminosos paralelos al incidir en la entalladura, se reflejan bajo ángulos variables α; siendo

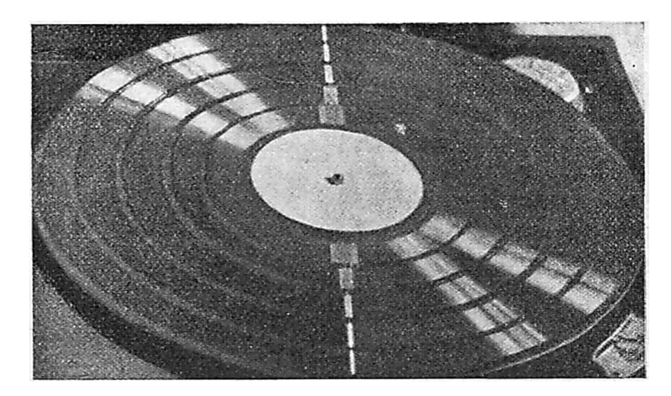


FIG. 77. Registro con señales de amplitudes distintas

el de valor máximo el correspondiente al rayo luminoso que cae en el punto de inflexión de la curva, se ve fácilmente que

$$r = \frac{dx}{dt}$$

y es, por tanto, la expresión de la velocidad; luego dicho ángulo en el punto de inflexión nos mide la amplitud de la velocidad.

Lanzando sobre un disco grabado rayos paralelos, se producen unas difusiones que permiten por comparación establecer la relación de amplitudes si las velocidades son distintas. En las figuras 76 y 77 se observan dos discos grabados con velocidad de amplitud constante y con velocidades en la relación 1 : 2 : 4.

La determinación absoluta de la amplitud puede hacerse también de otra forma; observando la figura 78 se deduce que: llamando R al radio de un surco donde se grabó la curva ABC, y n al número de revoluciones por segundo:

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{a}{2R} \quad ,, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{A\omega}{2\pi Rn}$$

$$A\omega = \text{amplitud} = \frac{a \pi n}{\cos \alpha} \simeq a \pi n \qquad (66)$$

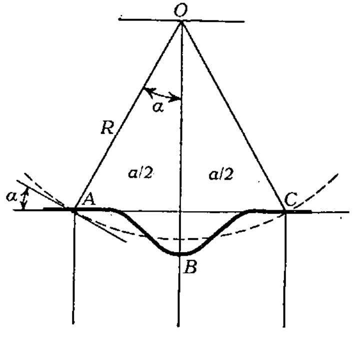


Fig. 78

Presión necesaria para vencer la fuerza vertical debida a la velocidad lateral en los fonocaptores. Para no descarrilar, el estilete debe ejercer de arriba abajo la suficiente fuerza vertical para vencer la componente del mismo sentido debida a la fuerza originada por la velocidad lateral del canal modulado del disco.

Se han hecho cálculos que dan las fuerzas verticales ejercidas por estiletes de diferentes radios, cuando se alojan en una canaladura patrón que tenga 88 grados de ángulo de inclinación, 0,058 mm de radio de curvatura de la sección cóncava del valle y un ancho de canal en la superficie de 0,175 mm. Además de las fuertes verticales se han estudiado las variaciones en la presión con diferentes tamaños de estiletes reproductores.

La figura 74 muestra un estilete alojado en un canal de disco de las dimensiones anteriores. Dos factores importantes que varían con el diámetro del estilete son: el diámetro de fricción d y el ángulo de acuñación.

El diámetro de fricción d tiene una influencia directa sobre el efecto de presión y sobre la respuesta en las frecuencias altas, debiendo ser lo menor posible, por otra parte, el ángulo de acuñación que determina la tendencia del estilete a elevarse por la pared del surco. Es indudable que debe establecerse un compromiso.

La figura 79 representa las variaciones de d y de α con el radio del estilete, y de su observación se puede deducir que el radio no debe ser menor de 0,063 mm ni mayor de 0,106 mm. Además, puesto que la curva de α es horizontal para radios del estilete, comprendidos entre 0,0025 y 0,0042 pulgadas y la curva del diametro d sube rápidamente

en dicho intervalo, se ve la conveniencia de emplear estiletes cuyo radio tenga alrededor de 0,076 mm. Cuando crece el radio del estilete es evidente que para una velocidad dada del canal decrecerá la salida que ha de obtenerse en las altas frecuencias.

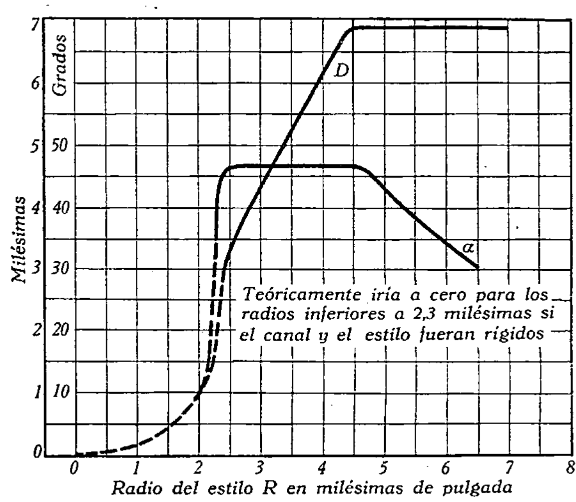


FIG. 79. Variación de D y a con el radio del estilo

Se han hecho cálculos sobre las pérdidas experimentadas en las frecuencias elevadas, y la figura 80 muestra la curva para esta pérdida de fricción a 7000 ciclos para estiletes cuyo radio varíe desde 0,038 a 0,127 mm; puede observarse nuevamente que el radio de estilete más indicado es el de 0,076 mm.

Novedades en la reproducción de discos. En los últimos años se ha registrado un notable aumento en la venta de aparatos fonográficos, siendo este un verdadero índice del aumento de interés hacia los discos como medio de distracción en el hogar.

Para mantener este interés es esencial que la reproducción del sonido sea de una alta calidad y permita programas agradables.

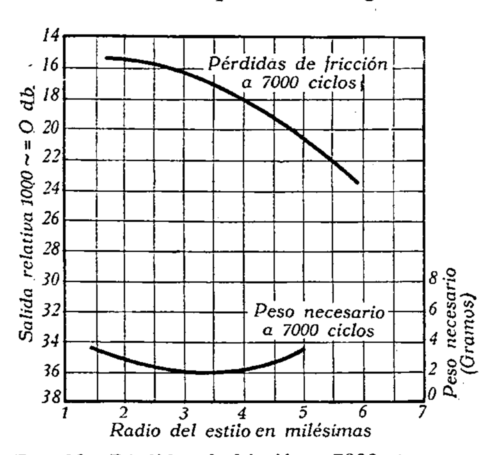


FIG. 80. Pérdidas de fricción a 7000 c/s para diferentes radios del estilo expresados en milésimas de pulgada

Durante la última decena de años se ha investigado para lograr mejorar las cualidades materiales del sistema registrorreproductor, y una fase de la investigación se dirigió hacia la posibilidad de reproducir frecuencias de 10 000 ó 12 000 c/s mediante discos de goma sin introducir un nivel de ruidos apreciable. Se han estudiado métodos para producir la señal modulada en frecuencia por un «pickup» especial y circuitos adecuados.

En la figura 81 se observa, de modo esquemático, la construcción de un «pickup» experimental de modulación de frecuencia. Un bastidor metálico sirve de soporte a una lámina aislada que constituye el electrodo de alta tensión del «pickup». A esta montura se ha fijado además una delgada cinta de metal. La cinta, que también se mantiene en un plano paralelo a la placa aislada y separada de ella por un pequeño espacio de aire, está montada con tensión para aumentar la frecuencia propia de resonancia del sistema. El alambre portaestilo se encuentra sujeto a la montura por un extremo superior, está unido a la cinta aproximadamente en el punto medio de su longitud, y su extremo libre se ha curvado en un plano sensiblemente paralelo al trazo del disco. El zafiro que sirve de estilete está sujeto al extremo inferior del alambre. La parte del alambre comprendida entre la cinta y el zafiro proporciona la suficiente flexibilidad vertical para hacer mínimo el ruido mecánico y reducir la distorsión debida al efecto de presión. Se ve en la figura 81 que un desplazamiento lateral del estilo produce una variación en la posición de la cinta respecto a la placa fija, dando por resultado una variación de capacidad. La longitud total de la montura es aproximadamente de media pulgada (1,27 cm). El espacio normal entre la placa fija y la cinta es aproximadamente de 0,1 mm.

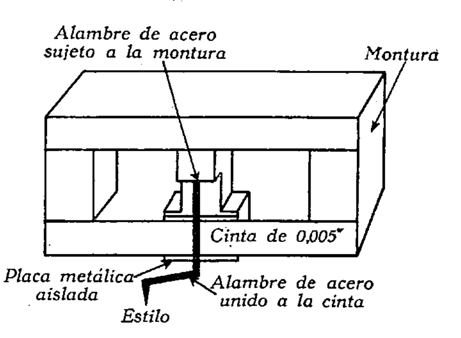


FIG. 81. «Pick-up» experimental, de modulación de frecuencia

Desde un punto de vista puramente teórico, es indudable que la variación de capacidad con el desplazamiento de la aguja en un «pickup» de modulación de frecuencia es susceptible de producir una dependencia lineal entre la variación de frecuencia y el movimiento del estilete, y, hablando técnicamente, el condensador que constituye el «pickup» debe ser de variación de frecuencia lineal.

Para diseñar un equipo de este tipo deben tenerse en cuenta las consideraciones siguientes:

1.° Frecuencia portadora a emplear.

2.° Circuito oscilador adecuado para usarse con el «pickup».

3.° Tipo de sistema discriminador de frecuencia y rectificador a emplear. Si el gramófono se va a usar en combinación con un receptor de radio, es ventajoso emplear una portadora que permita utilizar uno o más circuitos amplificadores de frecuencia intermedia. Si se proyecta el gramófono para un servicio separado, es preferible escoger una frecuencia en las proximidades de 30 megaciclos, particularmente en el lugar asignado por los organismos internacionales para los aparatos de diatermia.

En la figura 82 se ve un diagrama esquemático de circuitos con los que se han obtenido resultados satisfactorios. Con objeto de conseguir la máxima variación de frecuencia para una variación dada en la

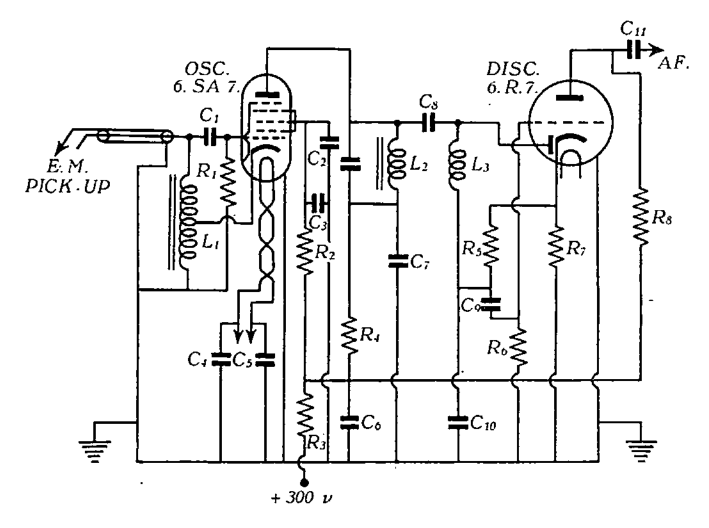


FIG. 82. Circuito del oscilador y discriminador de frecuencia-rectificador

capacidad del «pickup», es conveniente que éste vaya conectado directamente en el circuito resonante del oscilador. Se puede obtener esto montando el tubo oscilador y los elementos de este circuito en el mismo brazo del fonocaptor. Montando el tubo oscilador en el chasis principal del aparato y conectándolo al fonocaptor a través de una línea resonante de transmisión que hace de circuito sintonizado, se realiza un montaje todavía más conveniente, pues se eliminan determinados inconvenientes que se ponen de manifiesto con el primero.

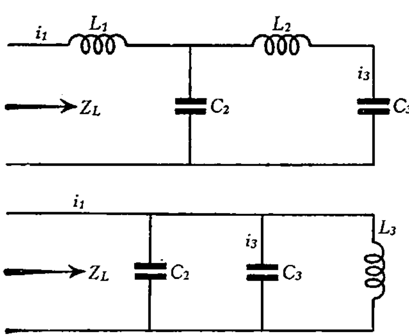


FIG. 83. Circuitos equivalentes para alta y baja frecuencia

El «pickup» experimental descrito ha dado una tensión eficaz de 6 a 8 voltios sobre la resistencia de carga, produciendo una nota de 400 ciclos con una amplitud de acanaladura de 0,0254 milímetros.

Puede calcularse la característica de respuesta total del sistema empleando los circuitos equivalentes de la figura 83. En estas figuras se ve que la corriente i_3 representa la velocidad de la cinta con respecto a la placa aislada, y la corriente i_1 representa la velocidad del estilete.

La relación de i_3 a i_1 dará la característica de respuesta del fonocaptor en función de la frecuencia.

Para frecuencias altas puede calcularse de la fórmula

$$\frac{i_3}{i_1} = \left(\frac{C_3}{C_2 + C_3}\right)\left(\frac{1}{1 - (2\pi f)^2 \dfrac{L_2 C_2 C_3}{C_2 + C_3}}\right), \qquad (67)$$

Para bajas frecuencias se emplea la fórmula

$$\frac{i_3}{i_1} = \left(\frac{C_3}{C_2 + C_3}\right)\left(\frac{1}{1 - (2\pi f)^2 L_3 (C_2 + C_3)}\right), \qquad (68)$$

Se puede observar que los dos tipos de la respuesta se origina uno en la resonancia del brazo fonocaptor y otro en la frecuencia alta

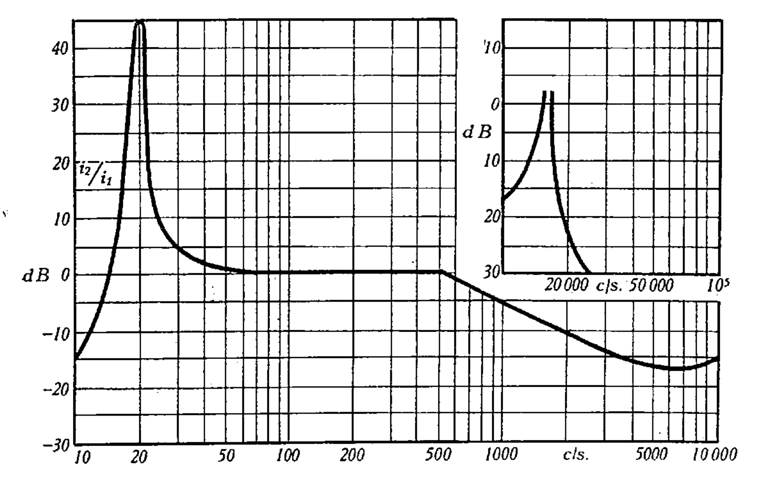


FIG. 84. Característica calculada de respuesta de «pick-up» y brazo

de resonancia del sistema móvil del fonocaptor. En la figura 84, se muestran la características calculadas según las ecuaciones anteriores.

Fonocaptores. Son los dispositivos que transforman la vibración mecánica de una parte de su sistema en variaciones de tensión eléctrica, reproduciendo bajo la forma de tensiones periódicas los sonidos que previamente se habían grabado en los discos.

Son verdaderos generadores eléctricos, y en la actualidad existen tres tipos fundamentales de ellos:

a) El *fonocaptor magnético.*
b) El *dinamoeléctrico.*
c) El de *cristal* o *piezoeléctrico.*

Fonocaptor magnético. Consta esencialmente de una bobina colocada en el entrehierro de un potente imán permanente, que tiene como núcleo una armadura metálica con un alvéolo donde puede ser fijada por medio de un tornillo o una aguja metálica.

La armadura puede oscilar en un pivote, desplazándose horizontalmente a uno y otro lado de una posición determinada de reposo.

FIG. 85. Esquema teórico de fonocaptor magnético

Cuando la aguja se desplaza siguiendo las sinuosidades grabadas en el disco, mueve con ella a la armadura, y el flujo a su través que era nulo en reposo por estar compensados dos a dos los cuatro entrehierros existentes (fig. 85), tiene ahora un valor determinado variable con la posición, induciendo una f.e.m. en la bobina que se lleva al amplificador. Como la f.e.m. inducida es proporcional a la variación de flujo y ésta lo es a la velocidad de la punta de la aguja, tendremos una curva de respuesta para este tipo de fonocaptor de la forma que se indica en la figura 86, siendo preciso, para tener a la salida del amplificador una curva de respuesta lineal total del sistema, que la primera variación en el fonocaptor sea compensada.

Fonocaptor dinámico. Es muy parecido al anterior; sólo se diferencia en que aquí se ha suprimido la armadura que servía para fijar la aguja y es directamente ésta la que se fija a la bobina. Cuando la

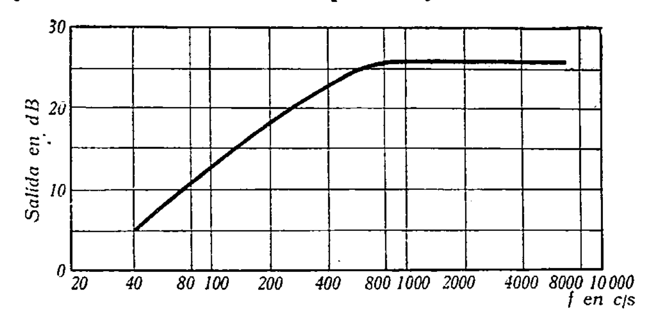


FIG. 86. Curva de respuesta de un fonocaptor magnético

bobina se mueve corta un número de líneas de fuerza variable, verificándose también que la f.e.m. inducida es proporcional a la velocidad, con lo cual la curva de respuesta es de forma idéntica a la dibu-

jada en la figura 86. En la figura 87 indicamos esquemáticamente el corte de la cabeza de un fonocaptor dinámico.

Fonocaptor a cristal. Ya conocemos los fenómenos de piezoelectricidad que estudiamos cuando se trataron los micrófonos. Tiene un soporte «cabeza», en el cual se dispone un elemento dimorfo donde llegan, obligándole a deformarse en torsión, las vibraciones de la aguja metálica. La tensión eléctrica generada es directamente proporcional a la deformación producida, con lo cual las curvas de respuesta tampoco serán planas, pues hay sistemas de grabación en los que las amplitudes del surco no son proporcionales a la frecuencia. En la figura 88 se pinta esquemáticamente un fonocaptor de este tipo.

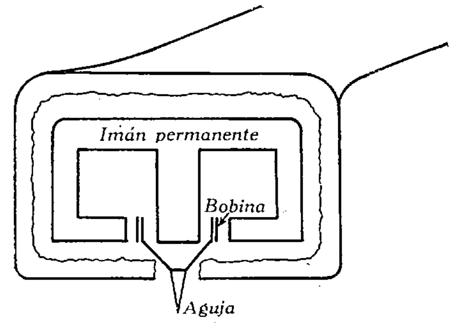


FIG. 87. Esquema teórico de fonocaptor dinámico

Modo de conectar los fonocaptores («pickup») a los amplificadores. Lo mismo los magnéticos que los dinámicos presentan pequeña impedancia interna, dándo niveles lo suficientemente altos para que se puedan conectar al segundo paso de los amplificadores. Los de cristal, por el contrario, se comportan como un generador en serie con una capacidad de valor muy reducido. La impedancia que ofrezca varía con la frecuencia, siendo alta a las bajas frecuencias y decreciendo a medida que la frecuencia aumenta. De todas formas presentan una alta impedancia, y es preciso hacer una entrada «alta impedancia» al amplificador.

Esta particularidad del fonocaptor a cristal afecta también a su curva de respuesta, pues la tensión de salida disminuirá a las bajas frecuencias, al mismo tiempo que aumenta la impedancia interna y, por tanto, la caída de tensión interior, siempre que la impedancia de carga no sea infinita o muy grande; esto obliga a colocar circuitos de entrada de alta impedancia. Se observará entonces que las curvas de respuesta variarán en circuito cerrado y en circuito abierto, es decir, haya o no caída de tensión interna, y así, colocando una resistencia de valor 0,5 meghomios en paralelo con el fonocaptor, se reduce la tensión de salida en unos 10 dB a la frecuencia de 100 ciclos.

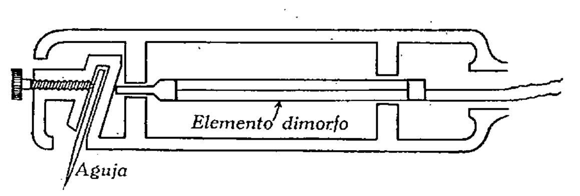


FIG. 88. Esquema teórico de fonocaptor piezoeléctrico

Capítulo II

Registro y reproducción fotoacústica

Generalidades. El proceso seguido corrientemente para registrar por este procedimiento el sonido es:

La presión acústica se transforma en tensión eléctrica utilizando los micrófonos, y a continuación, por el empleo de un traductor corriente-luz, podemos impresionar fotográficamente una banda sensible, con lo cual, después de un tratamiento de relevado y fijado fotográfico, habremos conseguido transparencias y opacidades proporcionales a las presiones acústicas primitivas, si es que se ha procedido con fidelidad.

En la reproducción se hace desplazar la banda entre una lámpara de incandescencia y un traductor luz-corriente; de esta forma, al traductor llegarán intensidades luminosas variables, según la transparencia de la película, y las corrientes generadas se llevan a un amplificador radioeléctrico a cuya salida un altavoz o conjunto de ellos volverán a reproducir el primitivo sonido.

Los métodos fotoacústicos se emplean preferentemente en cinematografía sonora, aunque en la actualidad también se diseñan aparatos registradores de esta clase que se utilizan para grabar en planchas destinadas a sustituir en el futuro a los discos gramofónicos corrientes. Se construyen también «lectores fotoeléctricos» para usos particulares.

Traductores corriente-luz. Como hemos indicado, tienen por objeto transformar las oscilaciones eléctricas en variaciones de flujo luminoso.

Hay tres tipos principales de estos traductores: los galvanómetros de vibración u oscilógrafos, células luminosas y célula Kerr.

Oscilógrafos. Suelen ser galvanómetros corrientes a los que se han hecho ligeras modificaciones y adaptados a sistemas luminosos y ópticos.

Puede explicarse su funcionamiento fijándonos en la figura 89. *F* es un foco luminoso constituído por una lámpara especial de incandescencia, y *L* una lente convergente en cuyo foco se coloca *F*. Los rayos luminosos saldrán paralelos para atravesar el limitador *A*, y a continuación inciden en la segunda lente, de donde salen concen-

trados para llegar al espejo *P* del oscilógrafo. Después de la reflexión llegan los rayos a una pantalla, que tiene una ranura en forma de triángulo, y una vez atravesada y después de pasar por una tercera lente cilíndrica, impresionan la cinta fotográfica que se desliza por delante.

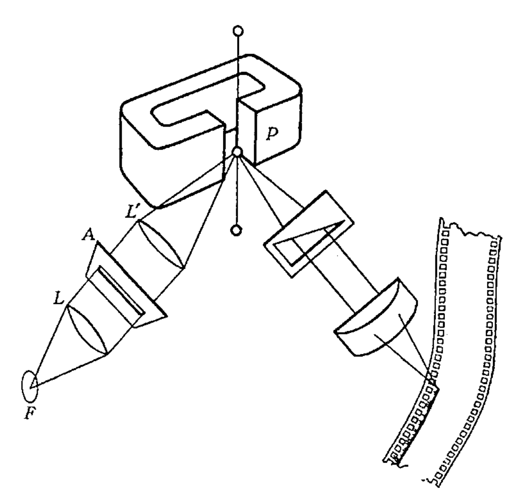
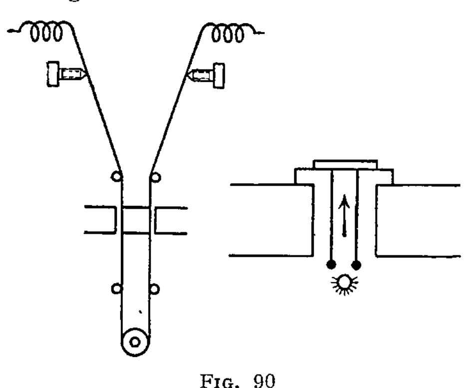


FIG. 89. Proceso teórico de grabación con oscilógrafo

Cuando al bucle del oscilógrafo no se aplica ninguna tensión, el rayo luminoso, después de la reflexión, incide en el vértice del triángulo, o sea, que no llega ninguna luz a la película, con lo cual ésta no es impresionada. El negativo será completamente transparente, y el positivo que de él se tome, totalmente opaco.

Al llegar una tensión gira el bucle, y al mismo tiempo el espejo que es solidario; el rayo luminoso girará un ángulo doble y atravesará el obturador un haz más alto y, por tanto, se impresionará más intensamente la película. La lente cilíndrica tiene por objeto hacer que, aunque el rayo luminoso se desplace antes de llegar a ella, siempre se fija su imagen sobre el mismo plano vertical. Entre los oscilógrafos más corrientemente empleados destaca el galvanómetro de cuerda de la Western Electric. Está formado por un hilo doblado formando un bucle y hecho de duraluminio. Este hilo se tensa por medio de una palanca que actúa sobre una polea. Además se disponen dos tornillos para fijar el hilo, por donde se hace la conexión al circuito exterior, pudiendo también servir para tensar igual que lo hacen las clavijas de un violín.


FIG. 90

El bucle con su soporte se coloca en el entrehierro de un potente imán, de forma que las líneas de fuerza sean normales al plano del bucle (fig. 90). De esta forma, cuando pasen por el hilo las corrientes procedentes del micrófono, la separación entre ambos se hará mayor o menor siguiendo la ley de Laplace y dejando pasar más o me-

nos luz, de la que procede de una lámpara de incandescencia, y, como consecuencia, se impresiona así la película, de acuerdo con los sonidos que se van a registrar.

La inercia del equipo móvil es causa de que los sonidos de alta frecuencia se registren mal, pero como el sistema presenta bastante elasticidad, se compensa este inconveniente.

El aparato es bastante sensible, ya que sólo son precisos 10 milivatios para obtener la máxima modulación de la cuerda. La resistencia es de unos 12 ohmios.

Células luminosas. Puede concebirse un nuevo traductor corriente-luz observando la figura 91. Las tensiones procedentes del micrófono

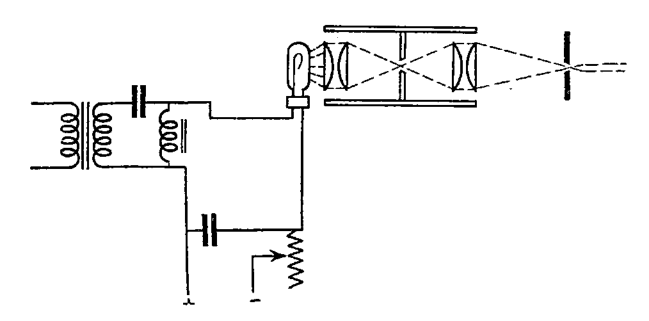


FIG. 91. Proceso teórico de grabación con célula luminosa

se llevan a una lámpara — de gran actividad actínica —, y así las variaciones de corriente se transforman en variaciones de flujo luminoso, y los rayos, atravesando un sistema óptico adecuado de enfoque, impresionan la película.

En ausencia de señal, el flujo procedente de la lámpara origina en la película un ennegrecimiento uniforme, el cual varía por los reforzamientos o debilitaciones que producen en la tensión aplicada a la lámpara las tensiones microfónicas.

La condición que deben cumplir estos traductores es que exista proporcionalidad entre la intensidad de la corriente y la luminosidad. Es preciso tener en cuenta que todas estas lámparas tienen como verdadera causa de su luminosidad el fenómeno de producción de átomos excitados por el choque de electrones con las moléculas neutras de un gas inerte y enrarecido que se encierra en la ampolla. Pueden existir descargas permanentes generales por causas distintas, tales como: emisión fotoeléctrica del cátodo por causa de la luz que desprenden los átomos excitados cuando pasan al estado normal como consecuencia de una descarga anterior, o por existir emisión secundaria debido al bombardeo del cátodo por los iones positivos que se producen al chocar los electrones primarios con las moléculas neutras del gas inerte. Estas descargas permanentes pueden ser molestas en determinados casos. También conviene estudiar la inercia luminosa de

estos traductores corriente-luz, que en algunos casos es apreciable. En cinematografía sonora se emplean mucho las lámparas de cátodos recubiertos de óxidos; dicho cátodo es de platino recubierto de una capa de óxidos de metales alcalinotérreos, siendo el ánodo de níquel. Se introduce helio a una baja presión, y la intensidad de caldeo oscila entre 10 y 15 miliamperios.

Para otras aplicaciones, tales como transmisión de imágenes, determinación de velocidades por métodos estroboscópicos, etc., se utiliza mucho el tubo de neón, aunque también puede usarse en cinematografía.

Célula «Kerr». Se funda este traductor en el fenómeno Kerr, consistente en que determinadas substancias entre las cuales la más interesante es el nitrobenceno ($C_6H_5NO_2$), se hacen birrefringentes cuando están sometidas a la acción de un campo electrostático.

Aparecerán, por tanto, en esas condiciones dos índices de refracción distintos con las direcciones de la luz polarizada en la dirección del campo y la normal a él, estando todas estas magnitudes ligadas por la fórmula

$$n_x - n_y = J \lambda E^2 \qquad (69)$$

FIG. 92

expresión en la que n_x y n_y son los índices de refracción, λ la longitud de onda de la luz y E la intensidad del campo y J una constante. Si hacemos que incida (fig. 92) un rayo de luz polarizada según la dirección que forma un ángulo θ con el eje XX' elegido según el eje eléctrico, y el rayo luminoso considerado tiene un vector eléctrico de la forma:

$$r = R \operatorname{sen} \omega t,$$

las proyecciones sobre ambos ejes serán:

$$r_x = R \operatorname{sen} \omega t \cos \theta$$
$$r_y = R \operatorname{sen} \omega t \operatorname{sen} \theta.$$

Después del recorrido a través de la célula, las componentes se pueden indicar por:

$$r'_x = R \operatorname{sen} \omega t \cos \theta$$
$$r'_y = R \operatorname{sen} (\omega t + \varphi) \operatorname{sen} \theta,$$

siendo

$$\varphi = 2 \pi l J E^2, \qquad (70)$$

expresión en la que l es la longitud de los electrodos, o sea, el recorrido del rayo a través del nitrobenceno.

En general, se puede decir que si eliminamos t en las dos ecuaciones anteriores, encontraríamos la expresión analítica que significa una cónica de género elipse; luego el primitivo rayo polarizado linealmente lo será en forma elíptica por el hecho de atravesar esta célula.

El caso más corriente es aquel en que el ángulo θ vale 45°, y entonces la ecuación de la elipse sería

$$r'^2_x - 2\, r_x'\, r_y' \cos\left[2\pi l J E^2\right] - r_y{}^2 - \frac{R}{2} \operatorname{sen}^2 \left[2\pi l J E^2\right] = 0 \quad ,, \quad (71)$$

La realización práctica de la célula Kerr se consigue tomando un recipiente de forma paralelepipédica que tiene dos ventanas trans-

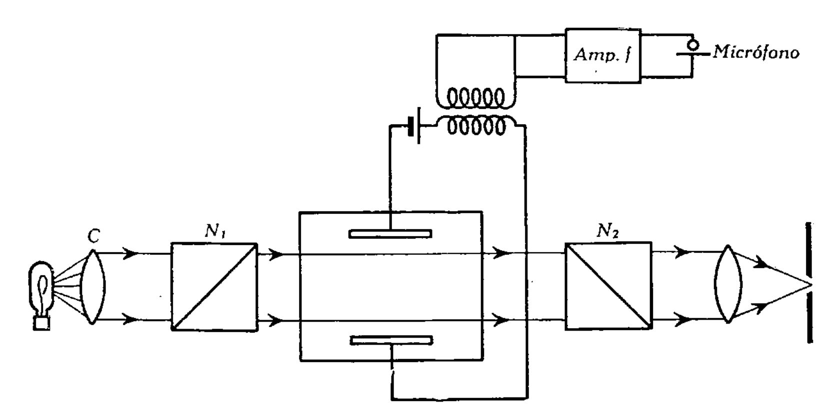


FIG. 93. Esquema teórico de grabación con célula Kerr

parentes en dos de las caras opuestas. Paralelas a otro juego de caras existen dos láminas o armaduras metálicas, entre las cuales existe una diferencia de potencial elevada. Delante de cada ventana se dispone un prisma de Nichol; actuando el primero de polarizador y el segundo de analizador.

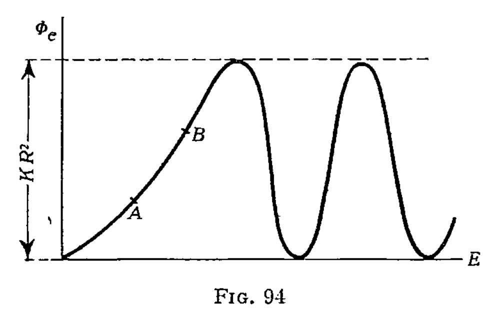


FIG. 94

Según se ve en la figura 93, un rayo luminoso que parta de la lámpara excitadora L y sea condensado por la lente C, atravesará el primer Nichol N, quedando polarizado linealmente. El camino que sigue a continuación es atravesar la célula, con lo cual se polariza elípticamente (si existe campo eléctrico), y el analizador constituído por el segundo Nichol sólo dejará pasar la componente del rayo polarizado que está situada según cierto plano. Se observa que la intensidad luminosa del rayo emergente es función de la tensión eléctrica que crea un campo en el interior de la caja de nitrobenceno, siendo, por tanto, el conjunto un verdadero traductor corriente-luz.

Postulando ahora que el polarizador produce un rayo cuya dirección forma un ángulo θ con el eje del campo y que el analizador deja pasar

el rayo contenido en un plano que forma un ángulo ψ, podemos expresar el vector eléctrico de la luz que atraviesa la célula en la forma:

$$r_e = r_x' \cos \psi + r_y' \operatorname{sen} \psi =$$
$$= R \operatorname{sen} \omega t \cos \theta \cos \psi + R \operatorname{sen} (\omega t + \varphi) \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \psi$$

y con las hipótesis anteriores:

$$r_e = R \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \cos \left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right)$$

El flujo luminoso emergente es proporcional al cuadrado del valor máximo de r_e:

$$\Phi_e = KR^2 \operatorname{sen}^2 \frac{\varphi}{2} = KR^2 \operatorname{sen}^2 \pi l J E^2 \quad ,, \qquad (72)$$

la variación de Φ_e respecto de E vendrá dada por la curva de la figura 94, obteniéndose el primer máximo para:

$$\pi l J E^2 = \frac{\pi}{2}$$

siendo el valor particular de E

$$E_1 = \sqrt{\frac{1}{2 l J}} \quad \text{y} \quad \Phi_{e,1} = KR^2 \quad ,, \qquad (73)$$

Las aplicaciones para grabado fotográfico se hacen colocando la célula de forma que trabaje en la parte AB de la curva de la figura 94, o sea, en el trozo rectilíneo de esa característica.

Este traductor trabaja prácticamente sin inercia; no obstante, debe tenerse en cuenta que no deben emplearse lámparas excitadoras ricas en rayos ultravioletas, pues el nitrobenceno actúa como un filtro absorbiendo las radiaciones de los rayos de longitud de onda inferior a unos 4500 angstroms.

La conexión de la célula es la que se indica en el esquema de la figura 93.

Nociones de fotoelectricidad. Traductores luz-corriente. Se conoce hace bastante tiempo la propiedad que tienen ciertos cuerpos de cambiar su estado eléctrico cuando absorben radiaciones luminosas.

Los fenómenos fotoeléctricos se clasifican en tres grupos:

a) Fenómenos de fotoemisión. Ciertos cuerpos desprenden electrones de su superficie cuando coincide sobre ella un rayo luminoso.

b) Fenómenos de fotoconducción. Hay substancias que pueden considerarse como semitransparentes y que desprenden electrones en todo su volumen al ser iluminadas.

c) Fenómenos fotovoltaicos. Se genera una f.e.m. en el cuerpo sensible al absorber radiaciones luminosas; si se completa un circuito eléctrico, pasará por él una corriente.

Existen, por tanto, también tres tipos de «células» que tienen el mismo nombre del fenómeno y que pueden considerarse como traductores luz-corriente; pero sólo vamos a ocuparnos de las células fotoemisivas, pues son las que tienen más importancia y las más corrientemente empleadas.

Si consideramos a la luz — según la teoría cuantística — como de naturaleza corpuscular, cada uno de esos «quanta» de luz tendrá una energía que viene dada por

$$W = Kf \quad ,, \quad \text{siendo } K = 6{,}55 \times 10^{-27} \text{ ergios/sg}$$

la constante de Planck y f la frecuencia de luz considerada (según las hipótesis ondulatorias corrientes).

Ese «quantum» de radiación, al chocar con el cuerpo sensible, entrega toda la energía, que se invierte en hacer que salte un electrón (fotoelectrón).

La ecuación de conservación de energía, llamando m a la masa del electrón y v a la velocidad de salida, será

$$Kf = \Phi + \frac{1}{2} m v^2 ; \qquad (74)$$

a Φ se le llama «función trabajo», y significa precisamente el trabajo que debe realizar el electrón para pasar de la capa en que se encuentra hasta la superficie del cuerpo sensible.

Se define la afinidad eléctrónica de una substancia como la relación $P = \frac{\Phi}{e}$,, siendo e la carga del electrón; Φ es una magnitud variable entre Φ_{min} y Kf, valores que corresponden a un electrón que esté en la superficie y a otro que llegase a ella desde una cierta profundidad, saliendo con velocidad nula.

Electrones más profundos ya no son emitidos.

Φ no se puede anular nunca.

La máxima velocidad con que son emitidos los fotoelectrones será:

$$v_{lím} = \sqrt{\frac{2\,(Kf - \Phi_{mín})}{m}} \quad ,, \qquad (75)$$

No todas las luces producen fenómenos de fotoemisión sobre un determinado cuerpo sensible, sino que hay una frecuencia mínima para la cual el fenómeno no existe; esta frecuencia, llamada «umbral», se determina evidentemente por la condición

$$\Phi_{mín} = Kf_h ,$$

con lo cual

$$\frac{1}{2} m\, v^2_{lím} = K\,(f - f_h) \quad ,, \qquad (76)$$

y se ve bien claro que para $v \gg v_h$ es cuando hay emisión.

Debemos hacer resaltar que la velocidad con que salen los electrones es función únicamente de la frecuencia de la luz, pero el número de ellos que se desprenden depende de la intensidad del rayo luminoso, o sea, del número de «quanta» de luz que llegan por unidad de tiempo.

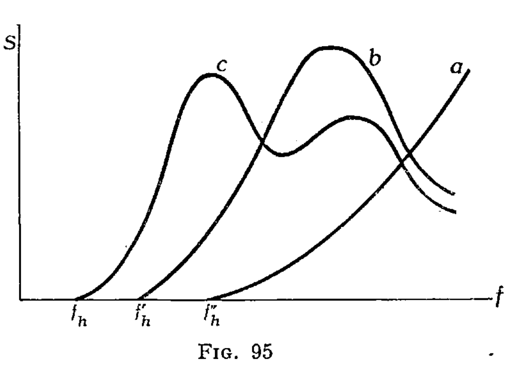


FIG. 95

Se define entonces la sensibilidad de una célula fotoeléctrica (fotoemisiva) a una cierta frecuencia, como el número absoluto de electrones desprendidos para una intensidad de luz determinada. Se puede medir en culombios/julio, amperios/watio o amperios/lumen.

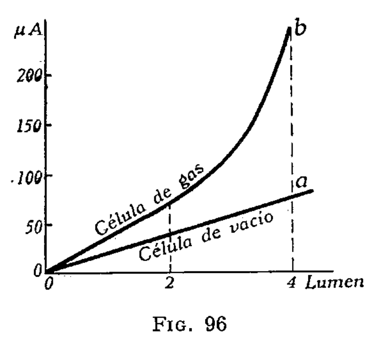


FIG. 96

Las curvas de sensibilidad de las células son de tres tipos diferentes, según la substancia sensible. En la figura 95 las hemos señalado con *a*, *b* y *c*. Las curvas del primer grupo parten de una determinada frecuencia umbral, creciendo la sensibilidad rápidamente con la frecuencia. Ejemplo: oro, plata, estaño, etc.

Las curvas *b* tienen un máximo a una cierta frecuencia de resonancia, diciéndose que la célula presenta selectividad espectral, por ejemplo, células de metales alcalinos. En *c* se observa una curva con dos máximos; corresponde a substancias no puras, es decir, a metales especiales sensibilizados.

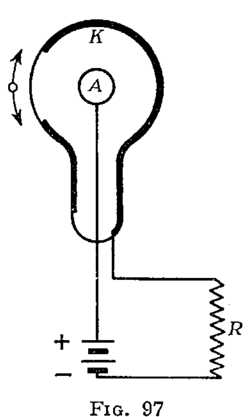


FIG. 97

Las células pueden ser de «vacío» o de «gas», según que en la ampolla se haya hecho un riguroso vacío o se haya llenado de un gas inerte.

La forma de las curvas de sensibilidad varía en general de forma que dicha sensibilidad crece más rápidamente que en la de gas (fig. 96).

Las células fotoemisivas suelen construirse según el esquema de la figura 97, consistente en una ampolla de cristal o vidrio (preferentemente vidrio, para que no sea corroído por los metales alcalinos), que está pintada en su interior, salvo en una pequeña región, con una capa de metal sensibilizado con óxido alcalino y obtenida por diversos pro-

cedimientos. Esta capa constituye el cátodo. Por fuera se recubre la ampolla con una pintura opaca, salvo la región *o*. El ánodo es una varilla terminada en una espira y que ocupa la región central.

Al ánodo se le da una tensión positiva, y así, los electrones desprendidos son atraídos por él, pudiéndose recoger en *R* una tensión función de la intensidad luminosa que incide en la célula.

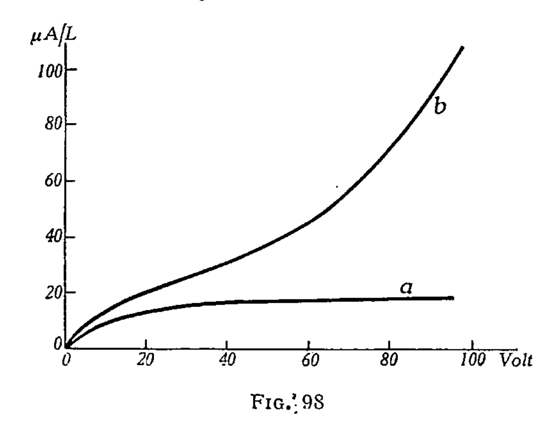


FIG. 98

Se puede variar la sensibilidad en la célula cambiando la tensión anódica. En la figura 98 se observa esta dependencia; la curva *a* corresponde a una célula al vacío, y *b* a una de gas. Podemos decir, como consecuencia, que en las de vacío hay una tensión de saturación a partir de la cual no aumenta la sensibilidad, y en las de gas *S* crece indefinidamente; sin embargo, no pueden pasarse de un cierto valor llamado tensión explosiva que destruiría la célula, pues una corriente

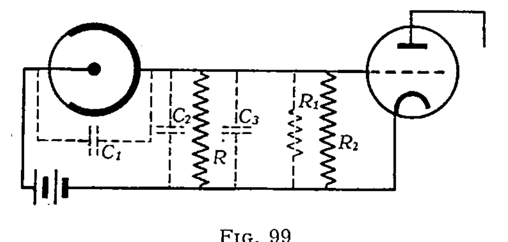


FIG. 99

excesiva volatilizaría el cátodo. La conexión de este traductor luz-corriente a los amplificadores se señala en el esquema de la figura 99. La verdadera impedancia que carga la célula es tal que

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R + R_1 + R_2} + j\,(C_1 + C_2 + C_3)\,\omega \;,,$$

$$|Z| = \frac{R + R_1 + R_2}{\sqrt{1 + \omega^2\,(C_1 + C_2 + C_3)^2\,(R + R_1 + R_2)^2}}$$

y, por tanto, la tensión es

$$V = S\,|Z|\,F \operatorname{sen} \omega t \;,, \qquad (77)$$

siendo S la sensibilidad de la célula y F el valor máximo del flujo luminoso.

Proceso de registro y reproducción fotoacústica. En la figura 100 se indican esquemáticamente todas las operaciones que deben realizarse para seguir el proceso del registro y reproducción fotoacústica. Los micrófonos M_1 y M_2 (puede ser uno sólo o varios) transforman la presión acústica en señal eléctrica que es convenientemente ampli-

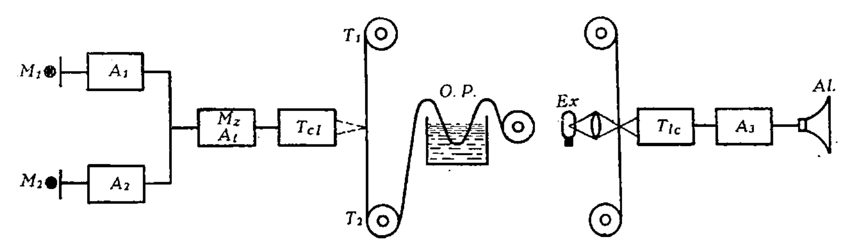


Fig. 100. Esquema teórico del proceso de registro y reproducción fotoacústico

ficada y mezclada por A_1, A_2 y M_z. La salida, de un nivel adecuado, excita el traductor corriente-luz T_{cl}, impresionándose la película sensible que pasa del tambor T_1 al T_2 a una velocidad determinada.

Una vez realizadas las operaciones fotográficas de revelado y fijado de negativo y positivo, termina la fase del registro.

En la reproducción se hace incidir un rayo luminoso procedente de la lámpara excitadora E_x, por la banda-registro de la película positiva, y el flujo luminoso variable ataca al traductor luz-corriente T_{lc}, cuya señal eléctrica es amplificada en A_3, excitándose a continuación el altavoz *A l.*

Sistemas generales de registro fotoacústico. Fundamentalmente existen dos sistemas de registro que determinan el tipo de traductores a utilizar; éstos son:

a) Registro a densidad constante y ancho variable.

b) Registro a densidad variable y ancho constante.

En la figura 101 damos las dimensiones de una película normal, señalando por *MM* la banda dedicada a la impresión sonora, y en *a* y *b* la forma cómo queda impresionada la banda, según el sistema de registro.

Registro a densidad constante y ancho variable. En este sistema de registro se utiliza como traductor corriente-luz el galvanómetro de vibración de espejo ya descrito. Está orientado el espejo del galvanómetro de modo que el rayo reflejado procedente de la lámpara

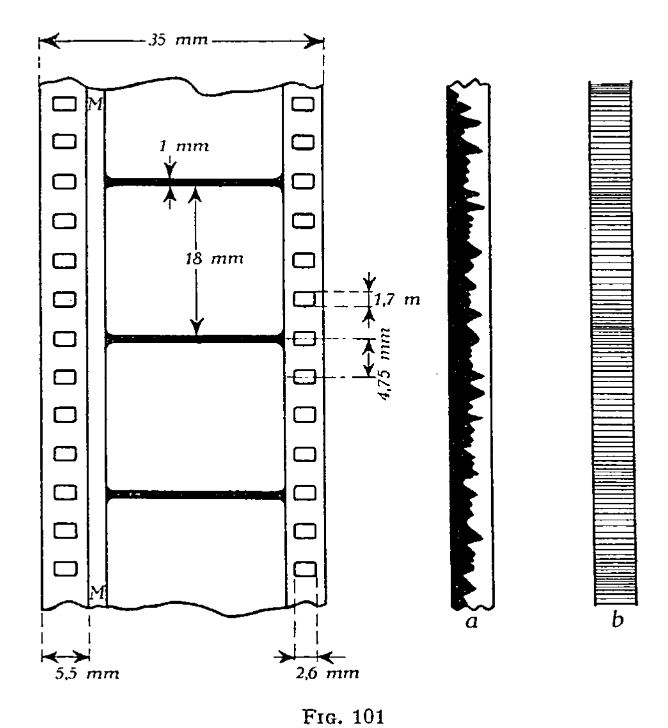


FIG. 101

excitadora impresiona una faja igual a la mitad del ancho de la banda MM (fig. 102). Si se excita el galvanómetro con una tensión sinusoidal

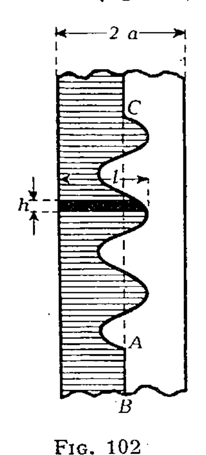


FIG. 102

$$e = E \text{ sen } \omega t,$$

la amplitud de la mancha obscura (la película se va desplazando a una velocidad de 45,6 centímetros por segundo) oscilará armónicamente alrededor de un valor a (llamando $2a$ al ancho del espacio reservado a la impresión fotoacústica). Si l es la elongación o longitud del trazo luminoso en un instante cualquiera de la impresión (fig. 102), se tendrá:

$$l = a\,(1 + KE \text{ sen } \omega t).$$

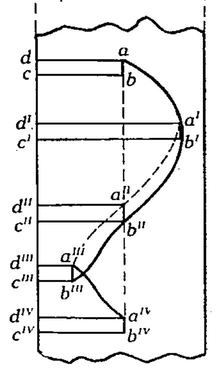


FIG. 103

Como consecuencia de la ecuación anterior, puede observarse fácilmente que si elegimos el producto KE, en el que K es una constante del galvanómetro, convenientemente, podremos conseguir graba-

dos de amplitud variable. Si KE es menor que la unidad, tendremos un caso tal como el señalado en la figura 102.

Para $KE = l$ los máximos y mínimos serían tangentes a los bordes de la banda, y para KE mayor que la unidad los picos estarían cortados y tendríamos distorsión.

Como K depende de la construcción del galvanómetro, se actúa sobre E haciendo mayor o menor la ganancia del amplificador de micrófono.

Efecto de hendidura. En el párrafo anterior no hemos tenido en cuenta que el trazo luminoso es un pequeño rectángulo de altura constante h y longitud variable l. La dimensión finita h, aunque en la práctica se hace lo más pequeña posible ($h = 0{,}025$ mm), produce distorsión no lineal, conociéndose el fenómeno por «efecto de hendidura».

En la figura 103 hemos dibujado un trozo de banda sonora en el que se pretende grabar una señal sinuosoidal pura. El pequeño rectángulo $a\,b\,c\,d$ es el trazo luminoso que va impresionando la película; en un semiperíodo es precisamente el vértice a el que al pasar por posiciones sucesivas va trazando el trozo de curva; en cambio, en el semiperíodo siguiente es el vértice b el que lo hace. Para obtener una sinusoide perfecta deberíamos suprimir la zona $a'\,a''\,a'''$, $b''\,a'$. Deducimos entonces que $a\,a'\,b''\,b'''\,b'\,b''$ no es una sinusoide, y sí solamente una curva periódica que podemos descomponer en infinitos términos sinusoidales desarrollando en serie de Fourier, y como consecuencia aparece una señal con todos sus armónicos, produciéndose distorsión no lineal como anunciamos.

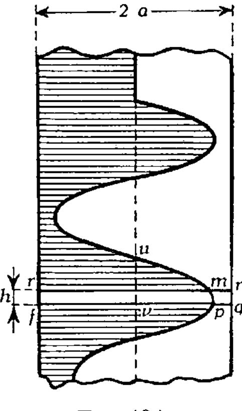


FIG. 104

Reproducción. En ambos sistemas se utiliza como traductor luz-corriente una célula fotoeléctrica, de la cual ya hemos hablado, pero ahora vamos a estudiar la distorsión que se produce en la reproducción por efecto hendidura en el proceso reproductor.

Si llamamos Φ al flujo luminoso correspondiente al rectángulo explorador (fig. 104) y procedente de la lámpara excitadora, a la fotocélula, llegará un flujo luminoso correspondiente a la superficie transparente $m\,n\,p\,q$, o sea,

$$\frac{\Phi}{2\,a\,h}(a\,h - \text{área } m\,p\,n\,r).$$

Para obtener la distorsión producida, calcularemos el flujo luminoso que atraviesa la película en un tiempo correspondiente al desplazamiento de un espacio h por el rectángulo.

Llamando V a la velocidad de desplazamiento, se tendrá

$$\Phi' = \int_{t}^{t+\frac{h}{V}} \frac{\Phi}{2\,a\,h}\,(a - KE \operatorname{sen} \omega\, t)\, d\,t =$$

$$= \frac{\Phi}{2\,a\,h}\left[a\,\frac{h}{V} + \frac{K\,E}{\omega}\left[\cos\omega\left(t + \frac{h}{V}\right) - \cos\omega\, t\right]\right] =$$

$$= \frac{\Phi}{2V}\left[1 - \frac{K\,E\,V}{a\,h\,\omega} \operatorname{sen} \frac{\omega\,h}{2\,V} \operatorname{sen} \omega\left(t + \frac{h}{V}\right)\right] \qquad (78)$$

Podemos considerar al término

$$\frac{K\,E\,V}{a\,h\,V} \operatorname{sen} \frac{\omega\,h}{2\,V}$$

como la amplitud variable de un movimiento sinusoidal de pulsación ω y que para ciertos valores de h se anula, mientras que para otros valores da amplitudes cada vez menores (fig. 105).

Si h fuese nulo, tendríamos:

$$\Phi' = \frac{\Phi}{2\,V}\left[1 - \frac{K\,E}{2\,a} \operatorname{sen} \omega\left(t - \frac{h}{V}\right)\right] \qquad (79)$$

y el flujo verdaderamente sinusoidal.

Cuando h crece, también los máximos de las amplitudes se hacen cada vez menores, pudiéndose llegar a una determinada frecuencia de corte a partir de la cual ya no se reproduce el sonido.

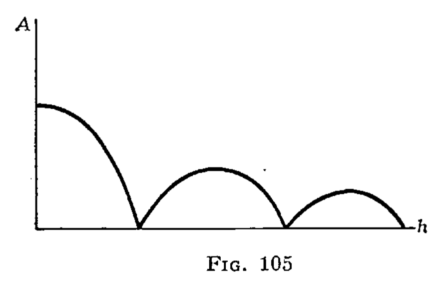


Fig. 105

Registro a densidad variable. Este sistema puede utilizar como traductor corriente-luz las lámparas de incandescencia especiales, galvanómetros de cuerda y la célula Kerr.

En todos los casos, el flujo luminoso instantáneo que impresiona la banda sonora es de la forma

$$\Phi_i = \Phi\,(1 - K\,E \operatorname{sen} \omega\, t),$$

siendo E la tensión máxima de la señal procedente del micrófono, K la constante de conversión y Φ el flujo luminoso que facilita el traductor en ausencia de señal.

Ya hemos dicho que en este caso no varían las dimensiones del rectángulo de luz que impresiona, y únicamente lo que cambia es el flujo luminoso.

Siguiendo el mismo proceso matemático utilizado cuando estudiamos el sistema de densidad constante, llegaríamos a deducir que en este sistema se registran mal las notas de frecuencia elevada, existiendo una frecuencia de corte a partir de la cual ya no puede hacerse el registro. Aquí no se introduce distorsión no lineal; sin embargo, el registro no es exactamente sinusoidal, pues la amplitud varía también en una forma periódica.

En todos los casos debe colocarse la banda sonora de forma que se desplace perpendicularmente al rectángulo de luz; si no fuera así, se produciría distorsión, debilitándose al mismo tiempo la señal.

Distorsiones debidas a las operaciones fotográficas. Se comprende que deben realizarse una serie de operaciones de laboratorio hasta conseguir disponer de la banda destinada a la reproducción. Una vez impresionado el negativo se precisa revelarlo y fijarlo; a continuación impresionar con él por transparencia un positivo, que a su vez es revelado y fijado. Estas operaciones, si no se realizan siguiendo una técnica cuidadosa, introducen una falta de fidelidad, pues lo que se pretende es que la positiva reproduzca exactamente el sonido original.

En el registro a densidad constante, donde sólo hay partes transparentes y partes completamente opacas, no tienen demasiada importancia estas operaciones, pero en el otro sistema de registro, su influencia es capital.

Es necesario dar algunos conceptos y definiciones de sensitometría, tales como:

Transparencia. Se llama así a la relación que existe entre el flujo luminoso que atraviesa un elemento de superficie de película y el flujo incidente en el mismo elemento:

$$T = \frac{d\Phi_a}{d\Phi_i}; \tag{80}$$

se extiende este concepto para una extensión finita, y entonces:

$$T = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} \tag{81}$$

La transparencia variará entre cero y uno.

Opacidad. Es la inversa de la transparencia:

$$O = \frac{1}{T}$$

varía entre infinito y uno.

Ennegrecimiento. Es el logaritmo decimal de la opacidad:

$$e_n = \log_{10} O = -\log_{10} T \text{ ,,}$$

varía entre infinito y cero.

Exposición. Se define por:

$$E = \int I\, d\, t, \tag{82}$$

siendo I la intensidad de iluminación considerada. Existe una relación entre la transparencia originada por la emulsión de una película y el logaritmo de la exposición; esta relación se traduce en las curvas obtenidas por HURTER y DRIFFIELD y que indicamos en las figuras *a*

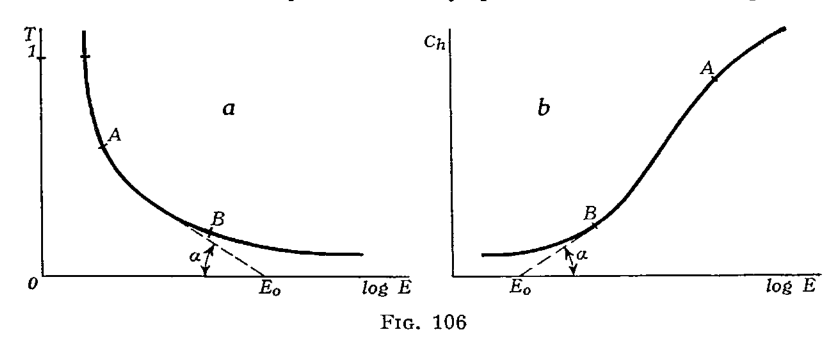


FIG. 106

y *b* de 106, según se tomen unos u otros ejes. En ambas curvas se ha señalado una parte aproximadamente recta, y en la cual las variables siguen una proporcionalidad. Prolongando esa parte AB hasta que corte al eje horizontal, se determina un ángulo α, cuya tangente se llama γ (el gamma de la emulsión), verificándose:

$$\gamma = \frac{d\, e_n}{d\,(\log E)} = \frac{d\, e_n}{d \log I\, t} \quad ,, \quad e_n = \gamma\,(\log E - \log E_o) \quad T = CE^{-\gamma},$$

siendo C una constante determinada por

$$C = E_o^{\gamma},$$

y E_o el punto de inercia de la emulsión.

Como tenemos operaciones fotográficas en el negativo y positivo, se satisface:

$$T_n = C_n\, E_n^{-\gamma_n} \quad ,, \quad T_p = C_p\, E_p^{-\gamma_p},$$

pero la condición de fidelidad obligará a que si iluminamos el negativo con un foco de intensidad Y, la exposición a que sometemos al positivo será proporcional a la transparencia T_n

$$E_p = Y \cdot T_n,$$

y, además,

$$T_p = K \cdot E_n,$$

de las anteriores se obtiene:

$$T_p = \frac{C_p}{C_n^{\gamma_p} \cdot Y^{\gamma_p}} \cdot E_n^{\gamma_n \gamma_p}$$

y para que se cumpla la ($T_p = KE_n$), es preciso que

$$\gamma_n \cdot \gamma_p = 1, \qquad (83)$$

puesto que se puede identificar la fracción con la constante K.

Esa condición de que el producto de los «gammas» sea la unidad, se cumple aproximadamente en la práctica. El «gamma» de los negativos (emulsiones rápidas de grano grueso) suele ser 0,7 ó 0,8, y en los positivos (lentas, grano fino) se procura tomar el inverso del anterior.

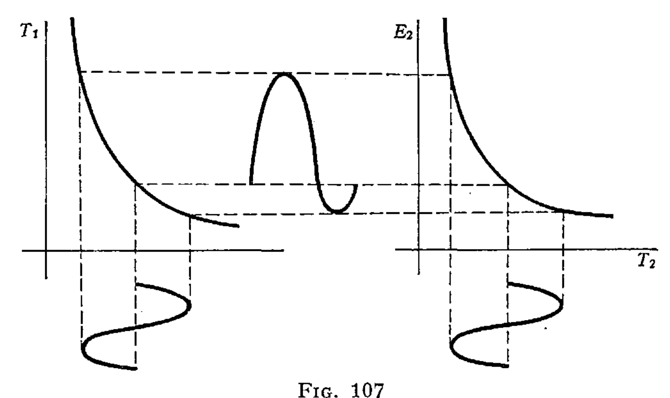


FIG. 107

Cuando se quiere acentuar el contraste, como en cinematografía sonora, se hace $\gamma_n \gamma_p$ algo mayor que uno; normalmente se trabaja con un «gamma» total igual a 1,5.

En la figura 107 se observa el proceso de laboratorio traducido gráficamente en las curvas de Hurter y Driffield, de modo que por ser el producto de los gammas igual a la unidad se obtiene una fidelidad absoluta.

Ruido de fondo. Existe un ruido llamado de fondo inherente a todo sistema de registro y reproducción fotoacústico; se pretende que los sistemas sean lo más silenciosos posible, pero esto nunca se puede obtener totalmente.

Los ruidos se generan en el grabado y en la reproducción, y en ésta se ponen de manifiesto todos.

a) Las causas que producen ruidos *en el registro* son:

1.° Ruidos propios del micrófono.

2.° Ruidos parásitos existentes en el «estudio».

3.° Ruidos generados en los amplificadores por efecto Scottky, Nyquist y zumbido de alterna.

4.° Imperfecciones de la película (pequeñas raspaduras, manchas, etc.).

5.° Tamaño finito de los glóbulos de sal de plata que constituyen la capa sensible.

b) *En la reproducción.*

1.° Ruido debido a la célula fotoeléctrica.
2.° Imperfecciones de la película.
3.° Ruido generado por efecto «Nyquist» en la resistencia de alto valor de entrada al previo.
4.° Ruido de amplificador.
5.° Zumbido de alterna en la excitación del altavoz.

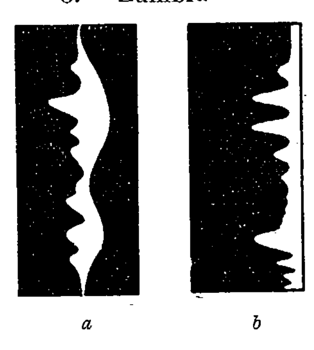


Fig. 108. *a*, Aspecto de la banda sonora empleando obturador; *b*, aspecto de la banda sonora al desplazar la línea de ondulación

De todas estas causas, unas ya han sido tratadas y otras tienen poca importancia, salvo en el caso que el amplificador sea de mala calidad. Lo que más afecta al ruido de fondo total es el causado por las imperfecciones del «film», y especialmente la falta de delimitación absoluta entre los blancos y negros del registro a densidad constante, y los rayados y manchas en la banda.

Se han diseñado muchos dispositivos (noiseeles) que tienden a suprimir los ruidos por medio de artificios. En los sistemas de densidad constante, como en los silencios la mitad de la banda es transparente, existirá un flujo medio del cual hablamos y que puede ser modulado por las variaciones de transparencia debido a manchas, etc. Es intuitivo el pretender que en los silencios — que es precisamente cuando más molesto sería el ruido de fondo — se suprima toda excitación de la célula, y por ello se hace una pequeña modificación en el registro, consistente en «tapar» la parte transparente en ausencia de señal, o bien correr la línea *ABC* de la figura 102, hacia la derecha.

El primer artificio se logra enviando parte de la tensión moduladora que actúa sobre el galvanómetro a un amplificador y a un detector. La tensión rectificada actúa moviendo un obturador que cierra el camino de los rayos luminosos reflejados en el espejo convenientemente. El aspecto que ofrece la banda sonora modificada por los dispositivos correctores de ruido, según ambos procedimientos mencionados, se señala en las figuras *a* y *b* de la 108.

Existen otros procedimientos de registro que no son más que modificaciones de los anteriores; así, por ejemplo, se consigue que la parte modulada sea simétrica y se produce con un galvanómetro de espejo que tiene un obturador triangular; el procedimiento es *R. C. A.* En los silencios, la parte transparente solamente tiene un ancho de 0,05 mm., y la amplitud máxima llega a valer 1,7 mm.

En la figura 109 se ofrece una banda con la particularidad de tener doble canal impresionado.

Es interesantísimo, como dijimos, que exista una delimitación perfecta entre los claros y la parte impresionada, en el caso de registro a densidad constante, lo cual se consigue utilizando, al obtener el negativo y las copias, luz monocromática para que no haya efectos de «halo».

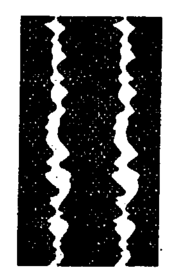


Fig. 109. Banda impresionada con doble canal

Si se utiliza luz blanca, o sea, un complejo de radiaciones monocromáticas en todo el espectro visible, así como en el infrarrojo y el ultravioleta, al atravesar el medio de caras paralelas que es la película o soporte de la emulsión, los rayos se separan siguiendo las leyes de la refracción, según los diversos índices (en el caso de no ser exactamente perpendicular el haz incidente), y si se verifica que el rayo llega según un ángulo mayor que el límite, habrá reflexión y obtendremos varias imágenes muy juntas de un solo punto luminoso, produciendo una zona de confusión. Además de emplear luces monocromáticas, se pueden usar películas especiales absorbentes a ciertas radiaciones o filtros adecuados.

Sistema de registro multitransversal. Hemos descrito someramente los dos procedimientos base del registro fotoacústico: ambos tienen inconvenientes graves, sobre los cuales ya hemos dicho algo. En el de densidad no sólo es un gran defecto que se introduzca distorsión no lineal, sino que si las frecuencias a grabar son elevadas y de una amplitud grande, el trazo que aparecería en la película sería tan estrecho

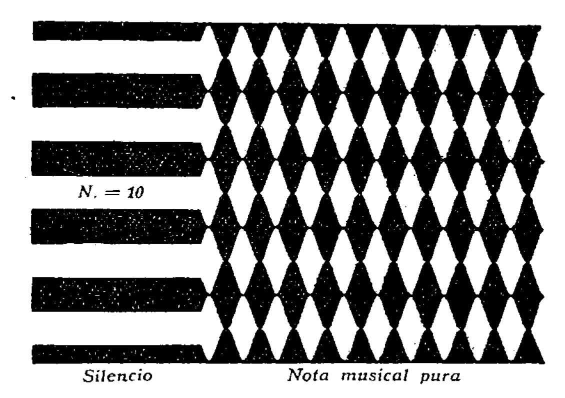


Fig. 110. Registro multitransversal (Laffón-Selgas) de una nota musical pura precedida de un silencio

que difícilmente conservaría nitidez la separación entre opaco y claro, con lo cual se produciría distorsión en el sonido. En los procedimientos a densidad variable, aunque emplean aparatos sin inercia mecánica, como la célula Kerr, lo cual es una ventaja extraordinaria, deben

cumplir requerimientos rigurosos respecto a las condiciones que deben atenderse en las operaciones fotográficas. Para utilizar las ventajas de ambos sistemas procurando no tomar sus inconvenientes, se han buscado muchos procedimientos que se conocen con nombres de: registro en «push-pull», clase *A B*, etc.

Una feliz realización es el sistema multitransversal español Laffon-Selgas, cuyo fundamento está basado en la descomposición de la sinusoide compleja de un registro transversal (densidad constante)

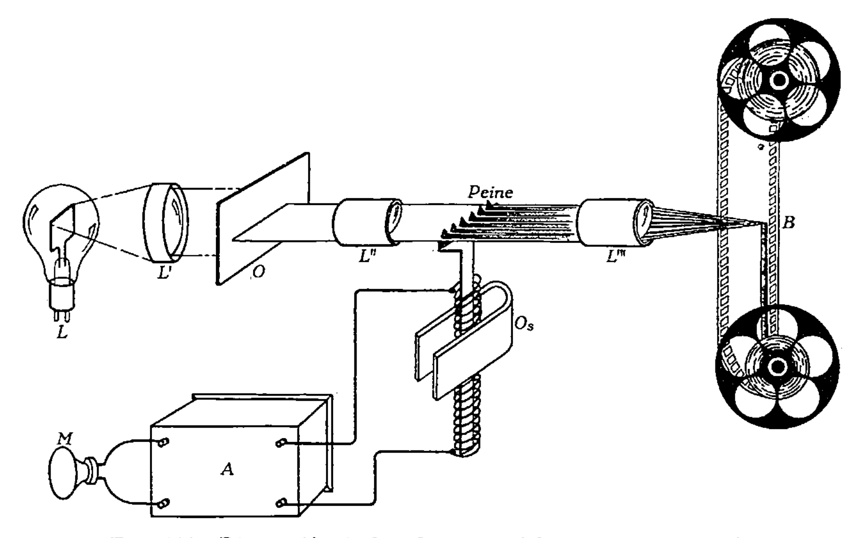


Fig. 111. Disposición de los elementos del registrador de sonido

en un cierto número *N* de sinusoides también complejas del mismo período, pero de amplitudes *N* veces menor. De esta forma se conservan las ventajas del sistema a densidad constante respecto a la facilidad de las operaciones de laboratorio, no existiendo ya el inconveniente de sinusoides muy afiladas por haberse dividido la amplitud en *N* veces.

En la figura 110 se observa el aspecto de una banda sonora impresionada según este procedimiento, utilizando una nota sinusoidal pura precedida de un silencio.

En la figura 111 hemos representado de forma esquemática la disposición de los aparatos que constituyen el sistema. La lámpara excitadora *L* envía un rayo luminoso que pasa a través de una lente y un obturador *O*, en el que existe una ranura de $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ mm. El rayo luminoso puede ser interceptado por una pieza metálica en forma de peine, que constituye el órgano más importante del oscilógrafo especial que es la esencia del sistema. A continuación, una lente hace juntar los *N* rayos que van a impresionar la película, según *N* canales.

Cuando se excita el micrófono *M* y se amplifica la señal en *A*, su salida atraviesa la bobina del oscilógrafo, desplazándose, por tanto, el peine en sentido vertical, según la ley de Laplace, modulándose el rayo de luz. Para que esta modulación sea independiente de la frecuencia a igualdad de intensidad de la señal de entrada, es preciso que siga la función-intensidad una ley parabólica de segundo grado, considerando como variable la frecuencia. Esto se ha conseguido diseñando amplificadores especiales que siguen esa ley utilizando acoplamientos capacitivos adecuados.

Capítulo III

Registro magnético

Aunque se conoce el procedimiento magnético de registro del sonido desde el año 1900 en que Poulsen indicó un medio de conseguirlo, no se ha desarrollado y empleado normalmente hasta hace unos años.

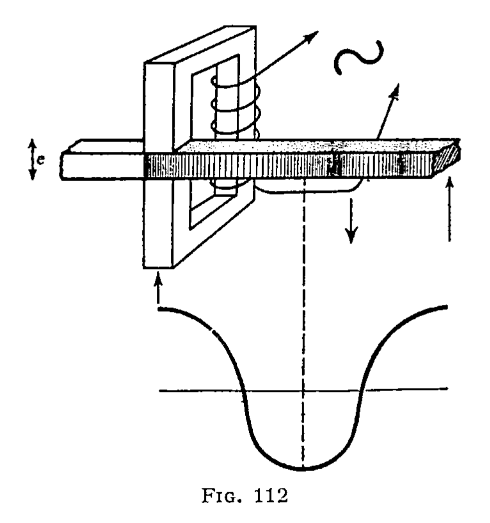


Fig. 112

El principio de funcionamiento es sumamente sencillo: si hacemos deslizar una cinta o hilo de acero u otra substancia capaz de magnetizarse entre las dos piezas polares de un electroimán, cuya bobina es recorrida por las corrientes que suministra un micrófono excitado, dicha cinta adquirirá una intensidad de imantación variable de acuerdo con las variaciones de campo magnético que crea el electroimán en la región por donde pasa la cinta. De esta forma se hará el registro.

El aparato es reversible, pues bastará hacer pasar la cinta otra vez entre las piezas polares, y la variación de reluctancia que se origina producirá una variación de flujo en el circuito magnético del electro-imán y, por tanto, una f.e.m. inducida en la bobina que aplicada a un amplificador y a un altavoz puede reproducir el sonido.

Se comprende que tendrá grandes ventajas el empleo de cintas en lugar de hilos, pues es fácil que éstos tengan un movimiento de rotación al mismo tiempo que avanzan, lo cual produciría en la reproducción un desajuste en la orientación de las líneas de fuerza y, por tanto, una distorsión causada por desacoplo mecánico.

Existen tres formas de grabar magnéticamente en una cinta, caracterizadas por el camino que siguen las líneas de fuerza; éstas son:

Perpendicular.

Transversal.

Longitudinal.

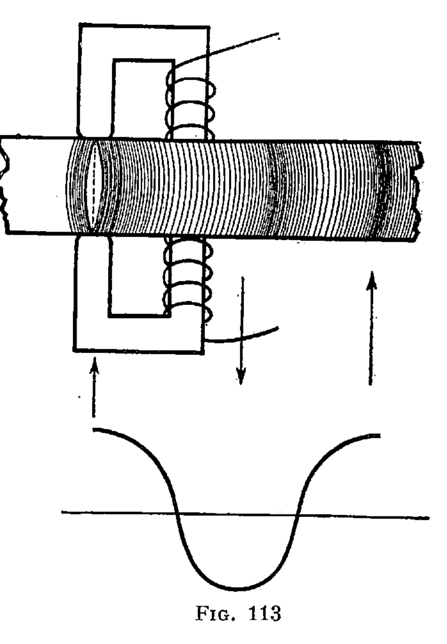


Fig. 113

En la primera se disponen las piezas polares de modo que dejen entre ellas un espacio igual al grueso de la cinta y, por tanto, las líneas de fuerza serán normales a la superficie de la misma (fig. 112).

Si el registro es transversal, el entrehierro del electroimán es igual al ancho de la cinta, y las líneas de fuerza son aproximadamente paralelas a esa dimensión (fig. 113).

Por último, si el registro es longitudinal, las piezas polares se enfrentan con la cinta, según indica la figura 114, o sea, que las líneas de fuerza son casi paralelas a la dirección de desplazamiento de la banda. Para deducir las condiciones magnéticas más favorables en que debe encontrarse la cinta con objeto de grabar en ella sin distorsión, podemos presentar los distintos casos que pueden suceder viendo lo que ocurriría en cada uno.

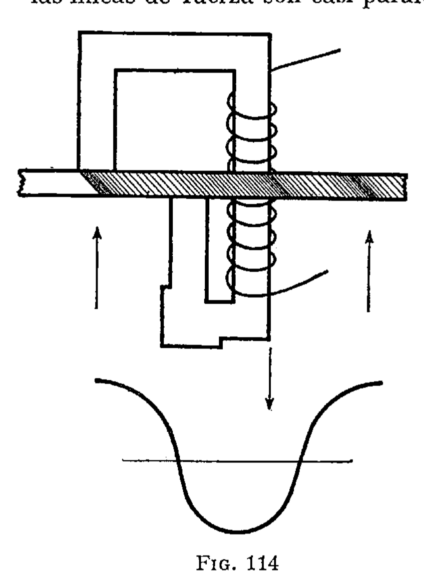


Fig. 114

Si la cinta se encontrase en estado magnético virgen y la obligamos a que se deslice entre las piezas polares del «electro» por cuya bobina circula una corriente sinusoidal, el campo sinusoidal H creado produciría una magnetización que, según se ve en la figura 115, no será sinusoidal, aumentando la distorsión si el campo creado tiene amplitud necesaria para producir la saturación del material.

Si trabajamos con el material saturado previamente, se produciría una gran distorsión, según se aprecia en la figura 116. Dando a la

cinta una cierta magnetización que venga determinada por la posición del punto de reposo *A* (fig. 117), obtendremos un buen registro y reproducción, ya que la zona *AR* puede considerarse como rectilínea.

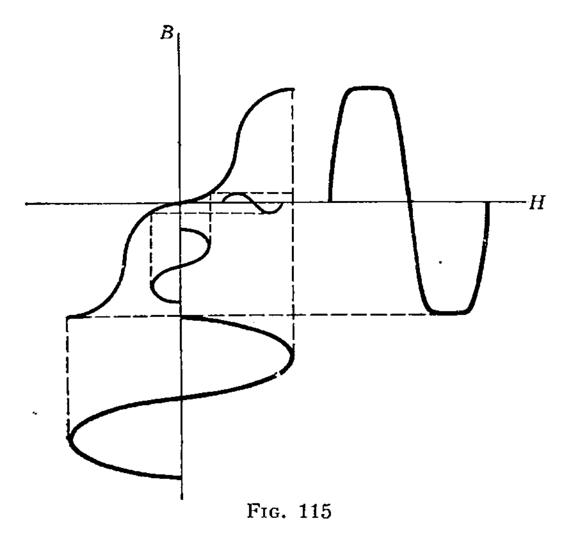


Fig. 115

De todas formas, tampoco es esto lo más conveniente, porque limita la amplitud de las señales a registrar, mejor dicho, el nivel dinámico no es amplio, y lo que se hace en la práctica es someter el material a la saturación magnética, con lo cual, cuando se va a pasar por el aparato para registrar en él, tendrá un magnetismo remanente caracterizado por la inducción de valor 30 por ejemplo (figura 117). Si se tiene en el circuito magnético dos bobinas magnetizantes, una de las cuales produce un campo constante H_r — que nos lleve la inducción al punto *R* o de reposo — y la otra produzca el campo variable a registrar, tendremos que la reproducción se hará prácticamente sin distorsión, permitiendo también grabar señales de grandes amplitudes.

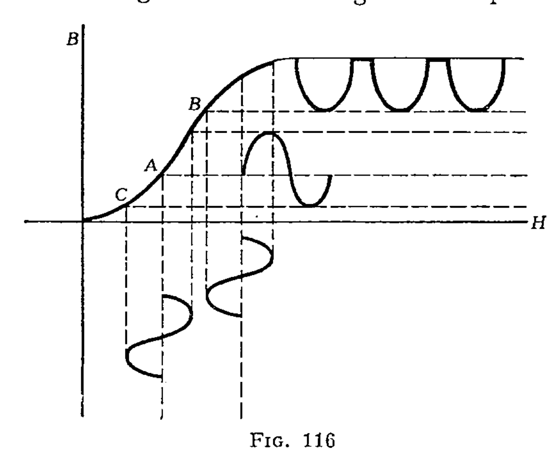


Fig. 116

Los sistemas de grabado en cinta magnética fueron muy desarrollados en los últimos años en Alemania, lográndose aparatos de fácil manejo, muy fieles y fácilmente transportables. Lübech indica una fór-

mula empírica que da la f. e. m. en u. e. m. que puede obtenerse en la reproducción utilizando el magnetofón de la Elektricitäts-Gesellschaft:

$$E = K\,i\,\frac{v}{g}\,e^{-\frac{r}{\lambda}}\,\text{sen}\,\pi\,\frac{g}{\lambda}\ ,, \tag{84}$$

siendo:

K una constante.
i la corriente de excitación en u. e. m.
v la velocidad de desplazamiento de la cinta en cm/sg.

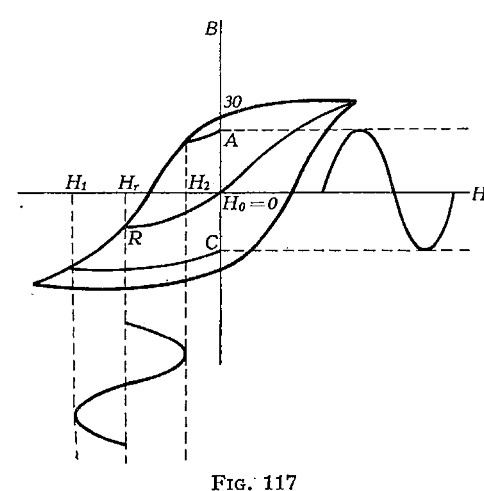


FIG. 117

g el espesor del aire en el entrehierro en cm.
r una constante que depende del material de la cinta.
λ la longitud de onda en cm.

En la figura 118 se indica un ábaco que permite calcular $e^{-\frac{r}{\lambda}}$ en función de la frecuencia para varios materiales magnéticos.

En la figura 119 se dan las curvas de respuesta de una cinta de acero que se desplaza a distintas velocidades. Puede observarse que las altas frecuencias se graban mejor cuando las velocidades de desplazamiento son grandes.

El registro magnético tiene algunas ventajas sobre otros sistemas de registro, que son:

1.° Manejo sencillo, empleándose cintas de material no combustible.
2.° Poderse borrar el grabado, no inutilizándose, por tanto, la cinta.
3.° Se pueden registrar frecuencias elevadas.
4.° Se eliminan las molestas y enojosas operaciones de laboratorio que requieren los métodos fotoacústicos.

Se presentan también, como es natural, inconvenientes, entre los cuales es de los más importantes el tener que utilizar cintas de gran longitud aún para registros de corta duración, pues el desplazamiento

de la banda se hace aproximadamente a doble velocidad que en la cinta cinematográfica. También son causas de pérdida de calidad las

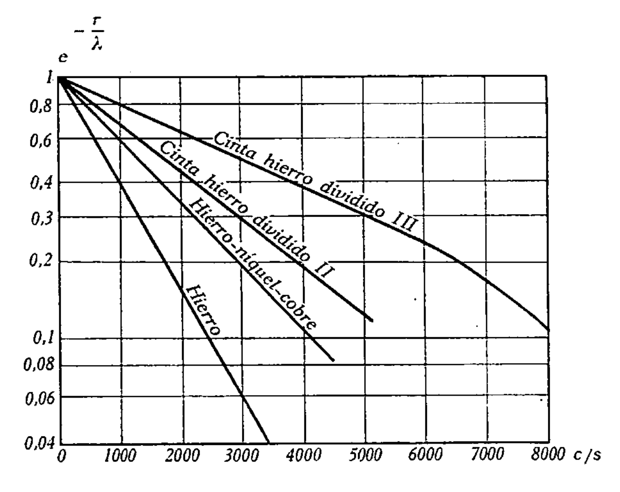


FIG. 118

vibraciones mecánicas que sufrirá la cinta al pasar por delante de los órganos donde existe el campo registrador, lo cual producirá un elevado ruido de fondo. Los golpes, etc., hacen variar igualmente las condiciones de registro.

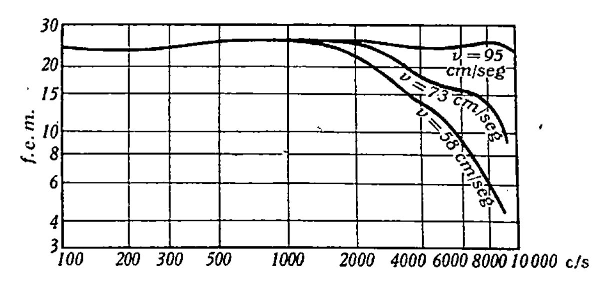


FIG. 119

Los métodos de registro magnético no se utilizan en cinematografía sonora, pero sí en radiodifusión y para obtención de reportajes, en dictafonos comerciales, etc.

CAPÍTULO IV

El amplificador de baja frecuencia

Planteamiento del problema. Es fácil diseñar un amplificador de baja frecuencia; sin embargo, deben cumplirse varios requisitos mínimos según el empleo a que se destine, y que deben tenerse muy presentes.

Cuando se proyecta un amplificador B. F. deben tenerse en cuenta dos principios fundamentales:

1.° Servicio a que se destina.

2.° Potencia acústica que debe servirse, y, como consecuencia, potencia eléctrica del amplificador.

Puede decirse que hay tipos fundamentales de amplificadores, atendiendo a diversas características; éstos son:

a) Según la potencia modulada.

b) De acuerdo con la clase de las válvulas finales.

c) Según el modo de funcionamiento del paso final («push-pull» clase A. B. 1, clase A. B. 2, etc.).

Es muy conveniente cuidar la elección de las válvulas finales si se quiere tener un amplificador de alta calidad; debe recomendarse el empleo de triodos, pues aunque con tubos tetrodos o pentodos se pueden obtener mayores potencias, la distorsión también es mayor.

El paso final ideal de todo amplificador es un montaje simétrico y en clase A. B. 1.

Con respecto al montaje simétrico, los amplificadores también se clasifican en dos grupos, según que sea clase A. B. 1 — o sea, sin corriente de rejilla — y clase A. B. 2, es decir, funcionamiento con corriente de rejilla.

En el primer caso se hace el acoplamiento al «push-pull» final, por medio de un transformador corriente o válvula desfasadora. En cambio, en el segundo caso debe ponerse un paso previo de mando «Driver» antes de las válvulas finales y después del paso cambiador de fase.

No vamos a entrar en detalles sobre el proyecto y construcción de un amplificador, ya que se incluye este estudio en tratados de Radiotecnia; sin embargo, sí vamos a discutir ciertos principios generales que deben aplicarse en el diseño de estos dispositivos cuando son de alta calidad.

Como norma general puede decirse que en un amplificador de gran fidelidad deben utilizarse como válvulas finales triodos. El paso cambiador de fase se hace con una sola válvula en montaje catodino.

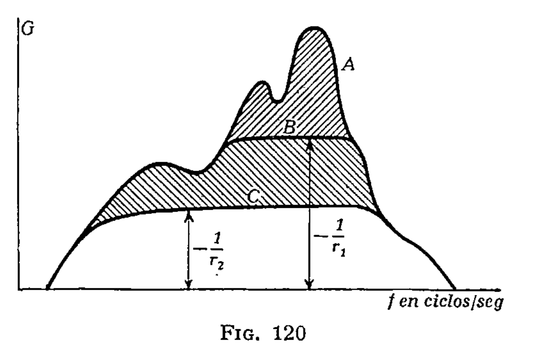


FIG. 120

Amplificador de contrarreacción. El principio general de funcionamiento de estos amplificadores se deduce de la fórmula general de la contrarreacción

$$A_r = \frac{A}{1 - rA}$$

A_r es el valor de la ganancia del amplificador cuando se aplica contrarreacción, y A es el valor de la ganancia antes de aplicarla.

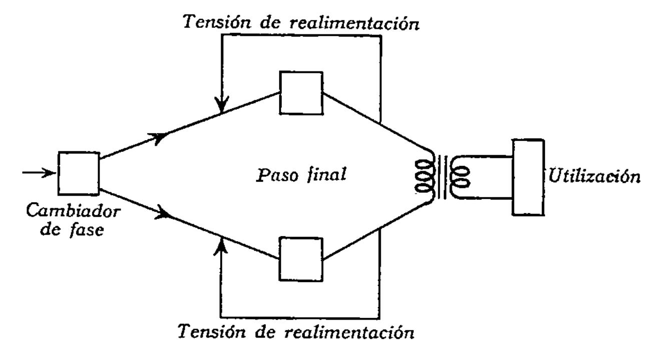


FIG. 121

r es el tanto por ciento de reacción, o sea, la fracción de tensión que se introduce otra vez a la entrada del amplificador.

Es muy interesante el papel que desempeña el factor rA, llamado factor de reacción. Si fuese superior a la unidad, la ganancia se convertiría en

$$-\frac{1}{r}$$

FIG. 122

que limita, por tanto, la ganancia de un amplificador reactivo. Los amplificadores de este tipo presentan una distorsión de frecuencia y de

amplitud tanto menores cuanto más grande es A_r, o sea, cuando r es grande, puesto que A sería la ganancia del amplificador ordinario. En la figura 120 se observan diversas curvas que significan las respuestas del amplificador sin reacción y para dos tipos de tanto por ciento de reacción. Observamos en la curva C, que corresponde al último caso, que se toma una amplificación total menor; sin embargo, es completamente plana en un amplísimo margen de frecuencia.

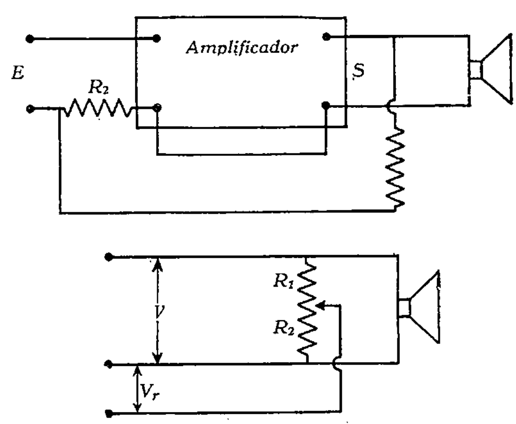


FIG. 123. Esquema de principio de un dispositivo de realimentación negativa a tensión. La tensión de realimentación vale $V_r = V \dfrac{R_2}{R_1 + R_2}$

Cuando se emplea contrarreacción en los montajes simétricos, debe tenerse gran cuidado; existen dos sencillas reglas que deben seguirse para obtener buenos resultados. Se puede hacer reaccionar una lámpara sobre ella misma o una rama sobre ella misma, con la condición de aplicar el mismo tratamiento a la otra rama, según se ve en la figura 121. Se puede tomar la tensión de contrarreacción en el circuito de utilización, o sea, el secundario del transformador de salida, inyectando dicha tensión antes del paso desfasador (fig. 122).

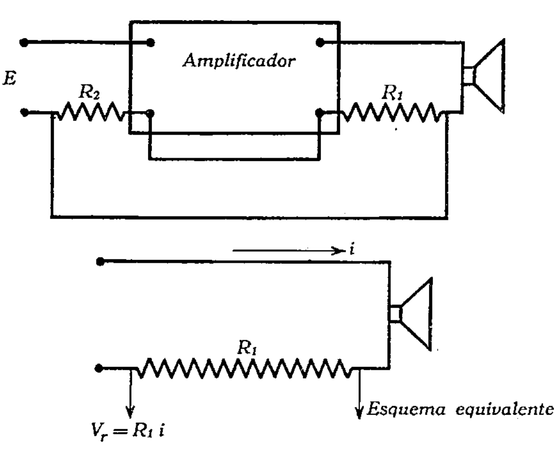


FIG. 124. Esquema de principio de un dispositivo de realimentación negativa a intensidad. La tensión de realimentación es proporcional a la corriente útil

Es preciso tener muy en cuenta que existen dos tipos de contrarreacción: a tensión y a intensidad. Cada uno de los cuales tiene características propias. En el caso de contrarreacción a tensión, dicha tensión es proporcional a la tensión útil; en cambio, en el segundo caso la tensión inyectada es proporcional a la intensidad actual. En las figuras 123 y 124 se ven los esquemas de principio de dichos procedimientos.

Paso desfasador. Aunque muchos constructores emplean para atacar los pasos finales un transformador (cosa que suele ser cómoda

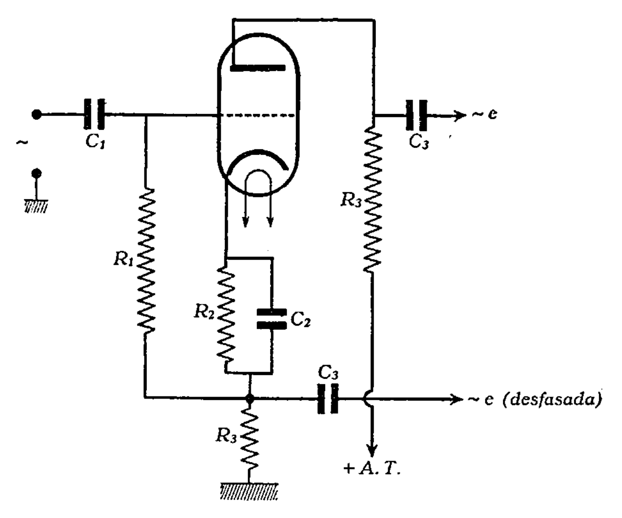


Fig. 125

y barata), interesa muchas veces emplear otros procedimientos, y nosotros aconsejamos los montajes catodinos. Un ejemplo del mismo

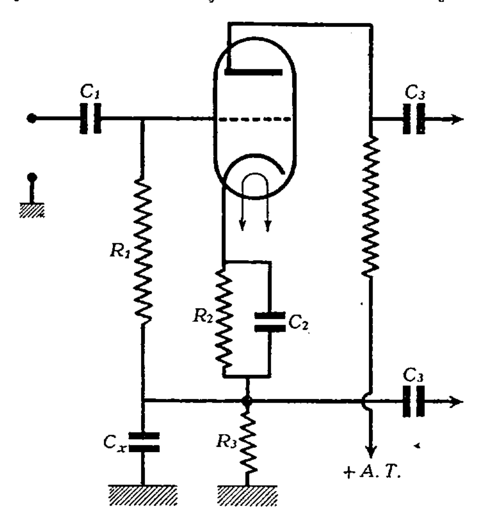


Fig. 126

se indica en la figura 125. El valor de las resistencias R_3 para las válvulas generalmente empleadas, $6F\,5$ ó $6D\,5$, suele ser de $20\,000\,\Omega$

ya que no debe admitirse una tensión superior a 60 u 80 voltios, entre el cátodo y el filamento de una válvula. Estas precauciones son nece-

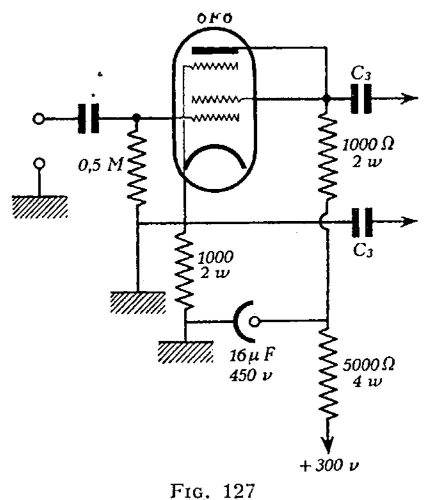


Fig. 127

sarias, porque el aislamiento entre cátodo y filamento en caliente no suele ser elevado, y resulta que si existiese una diferencia de potencia grande, se traduciría en el paso de una intensidad, produciéndose ruidos parásitos llamados de cátodo.

No obstante, no se suele poner este valor tan alto, porque se originarían disimetrías en las tensiones existentes en las resistencias R_3,

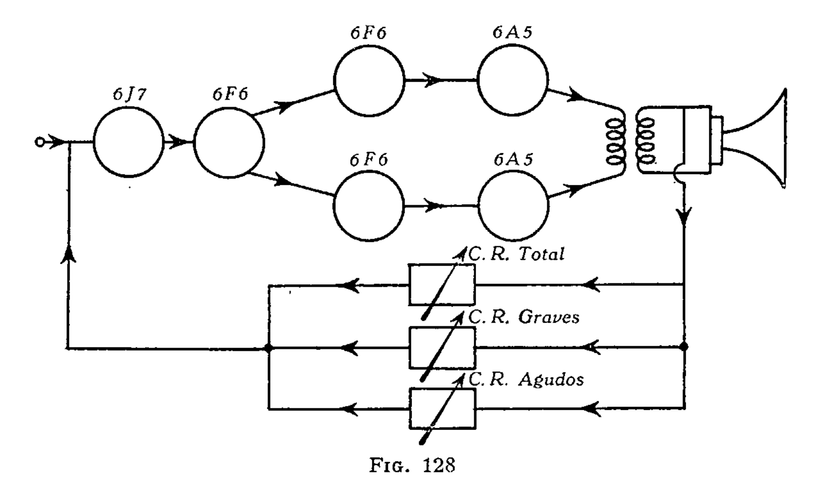


Fig. 128

debido a varias causas. En efecto, existe una capacidad importante entre el filamento y el cátodo, ya que el filamento se une a la masa

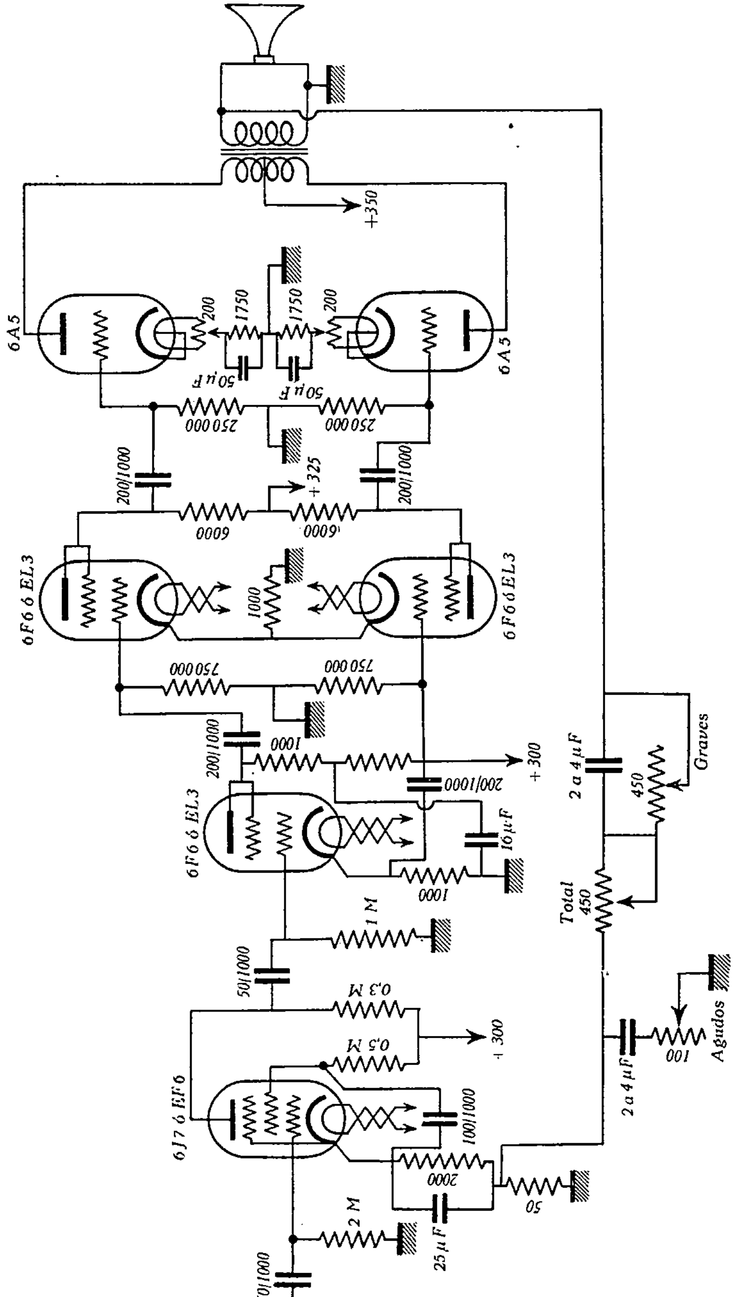


FIG. 129. Esquema teórico de amplificador de audiofrecuencia de 30/40 watios de potencia

del chasis, existiendo una capacidad entre cátodo y masa. Hay que tener además en cuenta que el condensador electrolítico de cátodo ocupa un gran volumen por ser de gran capacidad, aumentándose la capacidad con respecto a masa. Observaremos que la figura anterior debía ser modificada, según se ve en la 126, que incluye esta nueva capacidad.

La carga catódica ya no es R_3, sino esta resistencia con C_x en paralelo; carga que disminuye a medida que la frecuencia aumenta.

Un ejemplo práctico de los valores definitivos que por varias razones se suelen disponer en los tubos desfasadores en montaje catodino, es el indicado en la figura 127, donde se ve que se ha elegido un valor simplemente de 1000 Ω.

Estas resistencias deben ser idénticamente iguales, eligiéndose bobinadas para poder hacer que los ajustes sean precisos.

En la figura 128 indica el esquema teórico de conjunto de los pasos del amplificador, y en la figura 129 un amplificador de gran fidelidad en el que se asegura por el proyectista una respuesta uniforme entre 16 y 100 000 c/s.

TERCERA PARTE

Capítulo I

Propiedades fisiológicas y psicológicas del sonido

Generalidades. Al escuchar un sonido puro, es decir, al recibir la impresión sonora causada por la percepción de una onda sinusoidal en nuestro órgano auditivo, intuitivamente podemos distinguir dos particularidades, de las cuales ya hicimos mención: una característica de la frecuencia y que nos permite saber si un sonido tiene un «tono» mayor o menor que otro, o sea, es más «agudo» o «grave», y otra característica que permite saber si un sonido es más fuerte o débil que otro con el que se compara, lo cual depende de su amplitud.

Aunque el oído, si está suficientemente educado, puede llegar a percibir diferencias de tono muy pequeñas, no es apto para predecir el valor absoluto de la frecuencia de un sonido, nada más que aproximadamente.

Según esto, aunque al estudiar físicamente los sonidos se tiene en cuenta la frecuencia absoluta, al hablar de las sensaciones y, sobre todo, de las observaciones musicales, se habla de «intervalo», o sea, de relaciones entre las frecuencias.

Los sonidos comprendidos en las escalas musicales se nombran con los apelativos de las «notas»:

do	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

eligiendo para una «nota» — el *la*, por ejemplo — una frecuencia determinada, se fijan todas las demás porque la relación entre ellas son los números constantes que reciben el nombre de intervalos musicales y que hemos indicado más adelante.

El intervalo de valor 2 se llama octava, y así, la octava de un *fa* vuelve a ser *fa*, etc., y tendrá una frecuencia doble.

Bastará, pues, fijar una frecuencia para un tono y quedarán determinadas todas las notas.

CUADRO 6

Cuadro de valores absolutos de frecuencias de las notas musicales

A. Escala física. B. Escala internacional antigua. C. Escala internacional de 1939

Octava / Nota	$C_2 - C_1$	$C_1 - C$	C - C	$C - C^1$	$C^1 - C^2$	$C^2 - C^3$	$C^3 - C^4$	$C^4 - C^5$	$C^5 - C^6$	$C^6 - C^7$	Intervalo	Escala
do	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192		A
	16	32	65	129	259	517	1035	2069	4138	8277		B
c	16,35	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,5	2093,0	4186,0	8372	1,0000	C
re	18	36	72	144	287	575	1149	2299	4598	9195		A
	18	36	73	145	290	581	1161	2323	4645	9291		B
d	18,35	36,71	73,42	146,83	293,67	587,33	1174,7	2349,3	4698,6	9397	1,1225	C
mi	20	40	81	161	323	645	1290	2580	5161	10321		A
	20	41	81	163	326	652	1304	2607	5214	10428		B
e	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,5	2637,0	5274,0	10548	1,2599	C
fa	21	43	85	171	342	683	1367	2734	5468	10935		A
	22	43	86	173	345	691	1381	2762	5524	11048		B
f	21,83	43,56	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,9	2793,8	5587,6	11175	1,3348	C
sol	24	48	96	192	384	767	1534	3069	6137	12274		A
	24	48	97	194	388	775	1550	3100	6201	12401		B
g	24,50	49,00	98	196	392	783,99	1568,0	3136	6271,9	12544	1,4983	C
la	27	54	108	215	431	861	1722	3444	6889	13777		A
	27	54	109	218	435	870	1740	3480	6960	13920		B
a	27,50	55	110	220	440	880	1760,0	3520	7040	14080	1,6818	C
si	30	60	121	242	483	967	1933	3866	7732			A
	31	61	122	244	488	977	1953	3906	7812			B
b	30,87	61,73	123,47	246,94	493,88	987,76	1975,5	3951,1	7902,1	15804	1,8877	C
do	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192			A
	32	65	129	259	517	1035	2069	4138	8277			B
c	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093	4186	8372	16744	2,0000	C

En el Cuadro 6 señalamos los valores absolutos de la frecuencia en ciclos/segundo de las diversas notas con la nomenclatura representativa.

Se ha dividido el cuadro en una serie de columnas y casillas para poder clasificar todas las notas, según pertenezcan a la escala física, internacional antigua, o a la escala internacional acordada en 1939 en Londres. Cada nota es representada por una letra que está afectada de exponente, subíndice, es mayúscula o minúscula, según la octava a que pertenece. El «do» siempre se representa por una «c», el «re» por una «d», etc.

Las notas fundamentales elegidas para cada escala son: en la escala física el «do» de 512 c/s (c^2), en la internacional antigua el «la» de 435 c/s (a^1), que se llamaba también «la_3» o «la» normal; y en la internacional moderna acordada por la I. F. S. A. (International Federation of Standardizing Associations), en mayo de 1935, el «la» de 440 ciclos/segundo (a^1).

Para componer música son insuficientes los intervalos considerados, y se obtiene mayor número de notas «sosteniendo» o «bemolizando» las ya indicadas.

Los músicos consideran muchas veces los intervalos musicales como diferencias de frecuencias, pensando que entre una nota y la misma de frecuencia doble — su octava — siempre comprenden el mismo número de las otras notas, pero como entre una nota y su octava existe una diferencia que medida en ciclos/segundo es creciente y, sin embargo, el logaritmo de la relación de frecuencias de dos notas es constante cualesquiera que sean éstas — siempre que sean nombradas con el mismo apelativo de su octava —, esto, unido a que la relación 2 es fácilmente observable e identificable hasta por oídos no cultivados musicalmente, sugiere medir los intervalos en octavas y milioctavas aplicando la fórmula:

$$\text{Intervalo} = \log_2 \frac{f_1}{f_2} = 3{,}32 \log_{10} \frac{f_1}{f_2}$$

se eligen los logaritmos de base 2.

Citamos en el Cuadro 7 los intervalos musicales, indicando la denominación musical del tono; así el valor del intervalo aparece referido al «do» en forma decimal y también medido en milioctavas según la definición anterior.

Instrumentos musicales. Los instrumentos musicales pueden producir sonidos de muy diferente frecuencia; algunos producen amplias gamas, y otros gamas mas reducidas. En todos los casos cada sonido musical está constituído por una nota fundamental y un cierto número de armónicos convenientemente dosificados y que caracterizan al instrumento productor de sonido.

Los primeros armónicos ya caracterizan el «timbre» del sonido; sin embargo, también tienen gran importancia los armónicos superiores, pues son los que dan brillantez a la música.

Cuadro 7

Valores de los intervalos musicales

Los valores correspondientes a las casillas A corresponden a la escala natural, y en la B se indican los correspondientes a la escala diatónica temperada

Intervalo	Tono	Valor absoluto de $\frac{f_2}{f_1}$	Valor en milioctavas $m = 3{,}32 \times 10^3 \log_{10} \frac{f_2}{f_1}$	
Prima	do	1 = 1,000	0	A
		1 = 1,000	0	B
Coma		81/80 = 1,013	17,92	A
		1,000	0	B
Semitono	do ♯	25/24 = 1,042	58,89	A
		1,059	83,33	B
Tono menor		16/15 = 1,067	93,11	A
		1,059	83,33	B
Segunda menor	re ♭	27/25 = 1,080	111,00	A
		1,059	83,33	B
Tono		10/9 = 1,111	152,00	A
		1,122	166,6	B
Segunda mayor	re	9/8 = 1,125	169,9	A
		1,122	166,6	B
Segunda sostenida	re ♯	75/64 = 1,172	228,8	A
		1,189	250,0	B
Tercera menor	mi ♭	6/5 = 1,2	263,0	A
		1,189	250,0	B
Tercera mayor	mi	5/4 = 1,25	321,9	A
		1,26	333,3	B
Cuarta bemolizada	fa ♭	32/25 = 1,28	356,1	A
		1,26	333,3	B
Tercera aumentada	mi ♯	125/96 = 1,302	380,7	A
		1,335	416,5	B
Cuarta	fa	4/3 = 1,133	414,8	A
		1,335	416,5	B
Cuarta aumentada	fa ♯	25/18 = 1,389	473,9	A
		1,414	500,0	B
Quinta bemolizada	sol ♭	36/25 = 1,44	526,1	A
		1,414	500,0	B
Quinta	sol	3/2 = 1,5	585,0	A
		1,498	583,3	B
Quinta sostenida	sol ♯	25/16 = 1,562	664,0	A
		1,587	666,6	B
Sexta menor	la ♭	8/5 = 1,6	678,1	A
		1,587	666,6	B
Sexta mayor	la	5/3 = 1,667	737,0	A
		1,682	750,0	B
Sexta sostenida	la ♯	125/72 = 1,736	795,8	A
		1,782	833,3	B
Séptima menor	si ♭	9/5 = 1,8	848,0	A
		1,782	833,3	B
Séptima mayor	si	15/8 = 1,875	906,9	A
		1,883	916,6	B
Octava bemolizada	do ♭	48/25 = 1,92	941,1	A
		1,883	916,6	B
Séptima sostenida	si ♯	125/64 = 1,953	965,7	A
		2,000	1000,0	B
Octava	do	2 = 2	1000,0	A
		2,000	1000,0	B

La forma de producir sonidos en los instrumentos musicales también sirve para caracterizar y clasificar a éstos: pueden ser de cuerda o de viento. Los primeros se usan pulsando cuerdas, golpeándolas o frotándolas con el «arco»; así tenemos, como ejemplo de cada clase, la guitarra, el arpa, etc., el piano, etc., y violín, violoncelo, etc.

Los de cuerda se caracterizan también porque admiten que se produzcan en ellos varias notas simultáneamente formando «acordes». Las diversas notas fundamentales se producen variando la longitud de las cuerdas sobre las que se pulsa, golpea o frota.

En los de viento, al contrario, solamente se puede producir una nota cada vez, y a ellos se aplica la teoría física de tubos sonoros; pueden tener lengüetas como en el clarinete o una serie de orificios que se cierran o abren como en la flauta. En la trompa y la corneta, los labios del que ejecuta hacen el papel de lengüetas.

Características de la voz humana. El proceso de generación de los sonidos que constituyen la voz humana es el siguiente: por medio de los pulmones se impulsa aire a través de la laringe, aire que hace vibrar las «cuerdas vocales», las cuales modifican el área de una ranura, con lo cual se producen excesos de presión y enrarecimientos y, por tanto, ondas sonoras.

Las distintas posiciones de la lengua, labios, etc., producen peculiares articulaciones de los sonidos, y así se originan las distintas vocales y consonantes.

En todos los sonidos llamados «vocales» y en la mayoría de las «consonantes» intervienen las «cuerdas vocales», pero hay algunas «consonantes» producidas simplemente por el flujo de aire y por la posición adecuada de labios sin que vibren las «cuerdas», por ejemplo, p, f, s, etc.

La palabra humana está formada por vibraciones más o menos complejas, y, desde luego, además de las notas fundamentales, existen numerosos armónicos intensos.

La voz del hombre comprende frecuencias desde 100 a 8000 c/s, aproximadamente, y la voz de la mujer desde 140 a 9000 c/s.

Estas frecuencias se emiten con energías variables, pero puede decirse que para un orador que hable con una intensidad normal, el máximo de energía corresponde a los sonidos de 200 c/s.

Respecto al valor de esta energía, diremos que el flujo medio de energía por segundo teniendo en cuenta los intervalos de silencio normales en la conversación, es de unos 12 microwatios para la voz del hombre y unos 8 microwatios para la voz de mujer.

Estos valores, como hemos dicho, son medios y, por tanto, debemos tener en cuenta el concepto, pues en determinadas circunstancias la potencia puede ser muy superior, llegando fácilmente a los 2 ó 2,5 miliwatios.

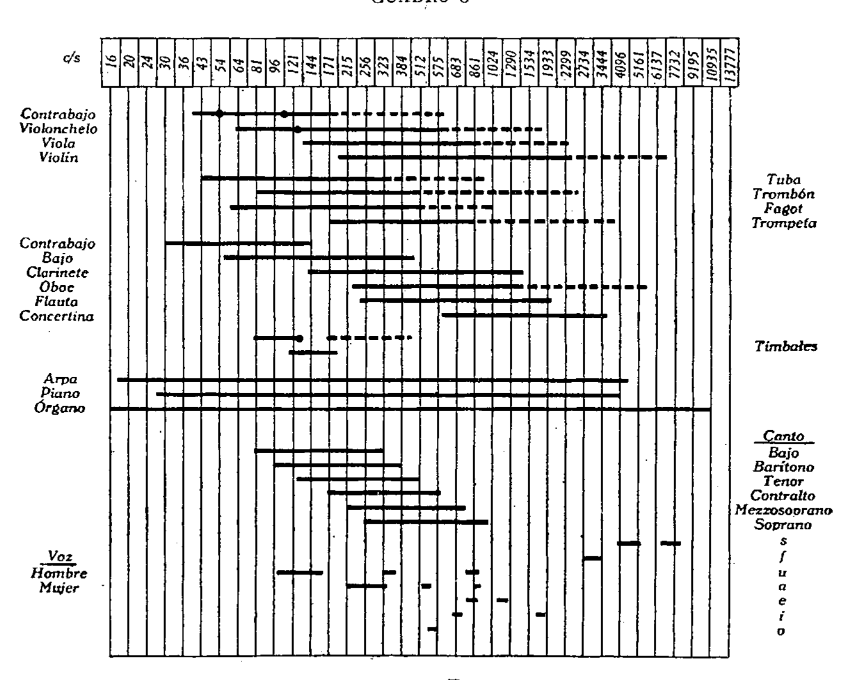
A continuación, y en el Cuadro 8 que incluímos, se indican las gamas de frecuencias que comprenden los diversos instrumentos musicales y la voz humana. Se ha representado por un trazo continuo la gama

de fundamentales, y por puntos de tamaño decreciente los armónicos de los fundamentales que también se han destacado con puntos.

Límite de audibilidad. El oído humano percibe sonidos en un amplio margen de frecuencias, siempre que tengan una intensidad adecuada.

La frecuencia mínima que puede percibir un oído normal varía entre 10 y 30 c/s, tomándose generalmente la cifra media 16 c/s como

Cuadro 8



margen inferior de frecuencias audibles. La frecuencia máxima varía entre 15 000 y 30 000 c/s, tomándose el valor 20 000 c/s como cifra media en esta zona.

Para poder oír un sonido de 100 c/s, por ejemplo, se necesita una intensidad muy distinta a la necesaria para escuchar uno de 4000 c/s., es decir, que se precisan potencias o energías acústicas distintas para poder percibir las diversas frecuencias.

Después de los trabajos efectuados por Flechter, Wegel y otros autores, operando sobre los resultados obtenidos con gran número de observadores, se han trazado gráficamente las curvas que limitan la zona de audición en función de la frecuencia y de la intensidad sonora en forma de presión acústica necesaria (fig. 131).

Se observa que el oído tiene una mayor sensibilidad para las frecuencias comprendidas entre los 1000 y 5000 c/s, puesto que se nece-

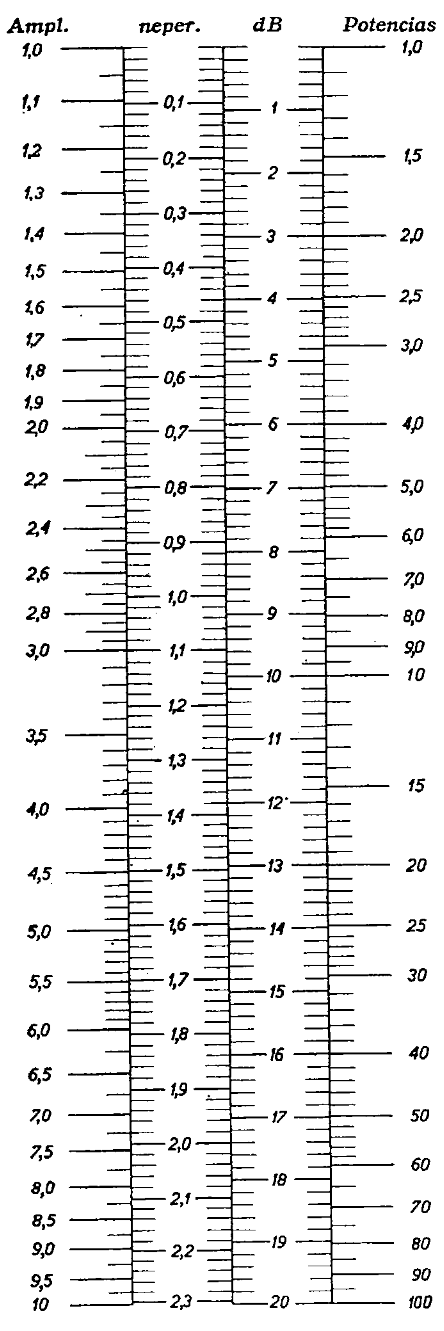


FIG. 130

sitan presiones acústicas menores para oír. La mínima presión acústica que produce sensación sonora es de unas 0,0006 dinas/cm² o barias, precisamente cuando la frecuencia es de 3040 c/s.

Si los sonidos son excesivamente intensos no producen sensación sonora, sino que la transforman en sensación de tacto que puede llegar a la impresión dolorosa.

Para una determinada frecuencia, el oído puede percibir pequeñas variaciones de intensidad, que, según KNUDSEN, son, en valor absoluto, aproximadamente igual —para notas comprendidas entre 100 y 4000 c/s— a $^1/_{300}$ del intervalo de presión comprendido entre las zonas umbral y de sensación de las curvas de límite de audibilidad, y para la nota de 1000 c/s.

También el oído puede percibir pequeñas variaciones de frecuencia para una intensidad fija. Para sonidos de intensidad media y frecuencias mayores de 500 centímetros se perciben variaciones de unas 4 milioctavas.

Para frecuencias más bajas, los intervalos son más amplios; así, por ejemplo, si pasamos de 50 a 50,5 c/s, difícilmente se observa el cambio, y, sin embargo, el intervalo vale 15 milioctavas. En el punto medio de la gama audible, y para una intensidad acústica correspondiente a la presión acústica de 10 barias, se pueden diferenciar 1300 sonidos de frecuencias diferentes.

Después de todo esto podríamos dividir la superficie de la zona de audición en pequeños cuadrados donde incluyéramos

todos los sonidos no diferenciables por variación de frecuencia o de intensidad, y así se pueden colocar unos 300 000 cuadraditos distintos, lo que quiere decir que se pueden diferenciar 300 000 sonidos por sus características de intensidad o frecuencia.

Ley de Frechner. Las sensaciones subjetivas percibidas se corresponden con las causas que las producen, según la ley de Weber-Frechner. Esta ley, aunque no es rigurosamente cierta (sólo lo es para sonidos medios y fuertes), satisface plenamente las necesidades del cálculo de las sensaciones, y se enuncia diciendo:

«La sensación (fenómeno psicológico) es proporcional al logaritmo del estímulo (fenómeno físico):

$$S = K \log E.$$

Esto da una característica matemática al oído humano y sugiere que lo mismo que se utilizan unidades logarítmicas para la medida de intensidades y potencias en general, se apliquen en Electroacústica las mismas unidades.

Se sabe que una potencia eléctrica se puede poner en función de la tensión o la intensidad en la forma

$$W = \frac{e^2}{R} = i^2 \cdot R;$$

por tanto, si la comparamos con otra potencia y tomamos logaritmos en cualquier sistema, se tendrá

$$\log \frac{W_2}{W_1} = 2 \log \frac{e_2}{e_1} = 2 \log \frac{i_2}{i_1} \quad ,, \qquad (85)$$

De la misma forma, para la intensidad acústica en función de la presión acústica o velocidad de las partículas de aire se tendrá

$$\log \frac{I_2}{I_1} = 2 \log \frac{P_2}{P_1} = 2 \log \frac{V_2}{V_1} \quad ,, \qquad (86)$$

Normalmente se eligen los logaritmos neperianos o los decimales, y así decimos:

La diferencia de nivel entre dos potencias W_2 y W_1 es de N nepers si se verifica

$$\frac{W_2}{W_1} = e^N \quad o' \quad N = l_n \frac{W_2}{W_1} \quad ,, \qquad (87)$$

La diferencia de nivel entre las dos potencias de referencia es de B belios si se verifica

$$\frac{W_2}{W_1} = 10^B \quad o' \quad ,, \quad B = \log_{10} \frac{W_2}{W_1} \quad ,, \qquad (88)$$

Se utiliza mucho más la unidad «decibelio» — décima parte del belio —, teniéndose:

$$N_{\text{decibelios}} = 10 \log_{10} \frac{W_2}{W_1} = 20 \log_{10} \frac{e_2}{e_1} = 20 \log_{10} \frac{i_2}{i_1} \quad (89)$$

$$N_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1} = 20 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 20 \log_{10} \frac{V_2}{V_1} \quad (90)$$

Para comparar potencias utilizando estas unidades, será preciso elegir una potencia y una presión acústica que tomaremos como nivel cero o de comparación. Se suelen elegir diversos niveles cero; en Telefonía y aplicaciones de radiotecnia suelen utilizarse los niveles cero de 1 miliwatio o 6 miliwatios; en Electroacústica, como esa potencia sería muy grande, se toman otros niveles.

Durante mucho tiempo se tomó como nivel cero el valor del flujo medio de energía de $2{,}5 \cdot 10^{-16}$ watios/cm², correspondiente a una presión acústica de $0{,}32 \cdot 10^{-3}$ barias. Este valor está a —70 decibelios (dB) del valor de presión de una baria, y es muy aproximado al valor de la intensidad umbral a 1000 c/s.

Después de la última reunión del C. C. I. F. (Comité Consultivo Internacional de Telefonía) se acordó elegir como nivel cero el correspondiente al valor de 10^{-16} watios/cm² para potencia o flujo medio de energía de la intensidad sonora, y $2 \cdot 10^{-4}$ barias de presión, que son los valores del dintel de audibilidad a 1000 c/s.

En la tabla de la figura 130 se comprende perfectamente la forma de cálculo para saber el nivel que significa la comparación de dos potencias o de dos amplitudes. Supongamos que las potencias W_2 y W_1 están en la relación:

$$\frac{W_2}{W_1} = 15.$$

Buscando en la columna de la derecha el número 15, vemos que se corresponde en las otras columnas con los números 11,75, 1,35 y 3,588; luego podemos decir que W_2 está 11,75 decibelios o 1,35 nepers por encima de W_1, y que la relación de las amplitudes es 3,588.

El problema general se resuelve por las fórmulas ya indicadas:

$$N_{dB} = 10 \log_{10} \frac{W_2}{W_1} \qquad N_{\text{nepers}} = l_n \frac{W_2}{W_1}$$

Ejemplo: queremos calcular el número de decibelios que corresponde a un flujo medio de energía de $5 \cdot 10^{-10}$ watios/cm² respecto del nivel cero de 10^{-16} watios/cm²; se tendrá:

$$n_{dB} = 10 \log_{10} \frac{5 \cdot 10^{-10}}{10^{-16}} = 10 \log_{10} 5 \cdot 10^{6} = 67 \text{ dB}$$

$$n_{\text{nepers}} = 10\ l_n \frac{5 \cdot 10^{-10}}{10^{-16}} = l_n\, 5 \cdot 10^{6} \doteq 7{,}658 \text{ nepers.}$$

Intensidad subjetiva. Hemos visto, al estudiar las curvas del límite de audibilidad, que el oído es distintamente sensible a los sonidos de diversa frecuencia, es decir, que una nota de un determinado nivel acústico, al variar de frecuencia, produce la impresión de variación de intensidad al mismo tiempo, aunque en realidad no haya cambiado la energía acústica.

Según esto, mientras se comparan dos notas de la misma frecuencia y consideramos como intensidad cero la correspondiente a una de las notas de energía acústica W_1, la otra nota de energía W_2 producirá una impresión subjetiva que estará sobre la otra N decibelios, según

$$N = 10 \log_{10} \frac{W_2}{W_1}$$

pero si las notas son de distinta frecuencia, veríamos que sonidos del mismo nivel producen intensidades subjetivas distintas.

Será preciso, para coordinar esto, definir una nueva especie de decibelio que llamamos «fonio».

El proceso seguido es: Se elige como nivel cero de energía el de una nota de frecuencia 1000 c/s y de flujo medio de energía

$$W_D = 10^{-16} \text{ watios/cm}^2,$$

y cuando se quiere comparar con este nivel una nota cualquiera se empieza por ver cuál sería la energía acústica (medida bajo la forma de flujo medio de energía) de una nota de 1000 c/s que produjera la misma intensidad subjetiva que la nota-problema, y entonces decimos: esta nota se encuentra

$$N_{\text{fonios}} = 10 \log_{10} \frac{W_{1000}}{W_D} \qquad (91)$$

por encima del dintel de audibilidad.

Ejemplo: Tenemos una nota de frecuencia 100 c/s y energía acústica medida por su flujo medio de energía de 45 dB por encima de 10^{-16} watios/cm². ¿A cuántos fonios le corresponde esta nota sobre el nivel cero normal?

Veríamos, por observación directa, que la nota de 1000 c/s que produce la misma intensidad subjetiva es la que tiene una energía de 10 dB por encima de 10^{-16} watios/cm.²; luego:

$$10 = 10 \log_{10} \frac{W_{1000}}{10^{-16}} \quad ,, \quad W_{1000} = 10^{-15},$$

con lo que

$$N_{\text{fonios}} = 10 \log_{10} 10^{-15}/10^{-16} = 10 \text{ fonios};$$

aunque en unidades absolutas, nuestra nota tenía una energía que estaba 45 dB sobre el mismo nivel.

Así se han trazado las curvas de igual sensación que aparecen en

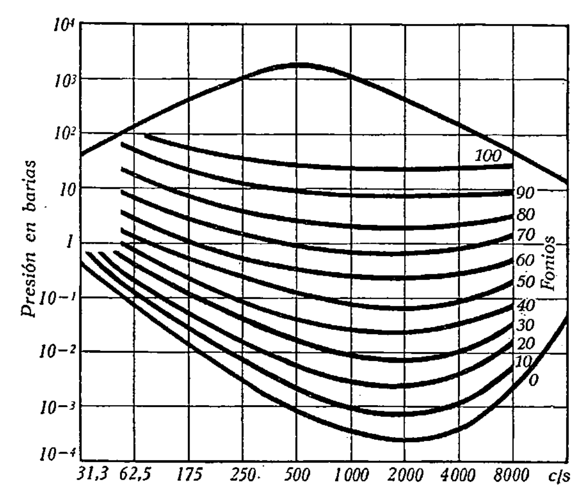


FIG. 131. Líneas de igual intensidad subjetivas (isofónicas)

las figuras 131 y 132 trazadas utilizando distintas variables. Se obser-

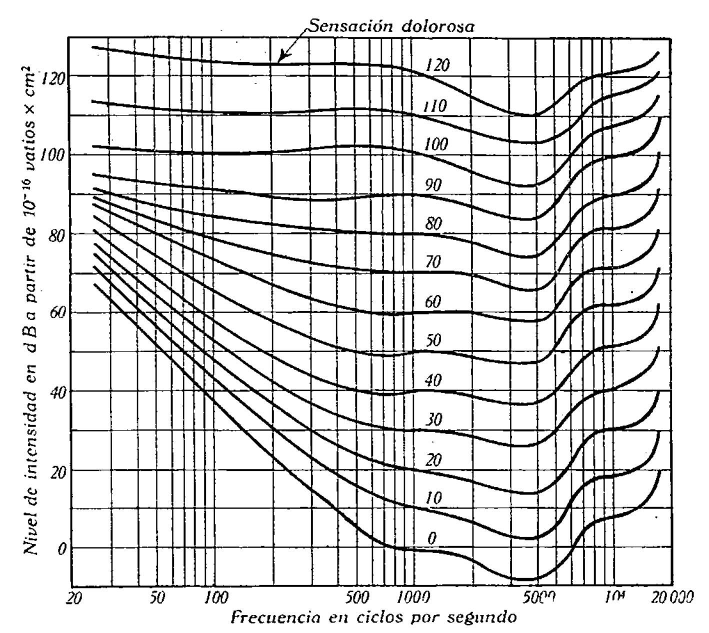


FIG. 132. Curvas de igual sensación o intensidad subjetiva (isofónicas)

va que notas de 30 c/s e intensidad 65 dB por encima de 10^{-16} wa-

tios/cm.², 100 c/s y 37 dB, 5000 c/s y —5 dB, etc., producen la misma intensidad subjetiva de 0 fonios.

En la tabla del Cuadro 9 se reproducen diversos niveles en fonios para diversas energías acústicas medidas en watios/cm² de notas de de 1000 c/s, señalándose también las presiones acústicas correspondientes y la velocidad de las partículas de aire que significa.

CUADRO 9

Nivel en fonios		Energía flujo medio en W/cm²	Presión acústica en barias	Velocidad de las partículas de aire en micras/sg
0		10^{-16}	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,05
10		10^{-15}	$0,63 \cdot 10^{-3}$	0,16
20		10^{-14}	$2 \cdot 10^{-3}$	0,5
30		10^{-13}	$6,3 \cdot 10^{-3}$	1,6
40		10^{-12}	$2 \cdot 10^{-2}$	5
50		10^{-11}	$6,3 \cdot 10^{-2}$	16
60		10^{-10}	0,2	50
61		$1,26 \cdot 10^{-10}$	0,22	56
62		$1,58 \cdot 10^{-10}$	0,25	63
63		$2 \cdot 10^{-10}$	0,28	71
64		$2,5 \cdot 10^{-10}$	0,32	79
65		$3,2 \cdot 10^{-10}$	0,36	89
66		$4 \cdot 10^{-10}$	0,40	100
67		$5 \cdot 10^{-10}$	0,45	112
68		$6,3 \cdot 10^{-10}$	0,50	126
69		$8 \cdot 10^{-10}$	0,56	140
70	Interpolación	10^{-9}	0,63	158
71		$1,26 \cdot 10^{-9}$	0,71	177
72		$1,58 \cdot 10^{-9}$	0,80	200
73		$2 \cdot 10^{-9}$	0,89	220
74		$2,5 \cdot 10^{-9}$	1,00	250
75		$3,2 \cdot 10^{-9}$	1,12	280
76		$4 \cdot 10^{-9}$	1,26	310
77		$5 \cdot 10^{-9}$	1,4	350
78		$6,3 \cdot 10^{-9}$	1,6	400
79		$8 \cdot 10^{-9}$	1,8	460
80		10^{-8}	2	500
90		10^{-7}	6,3	1600
100		10^{-6}	20	5000
110		10^{-5}	63	16 000
120		10^{-4}	200	50 000

Ayudándonos de la tabla de interpolación se pueden calcular las energías, etc., para cualquier número de fonios.

Supongamos que se quiere calcular E, P, V para 47 fonios. Como 47 fonios = 67-20, y los valores de E, P y V se repiten multiplicados por 100, 10 y 10 cada 20 fonios, se tendrá:

$$E_{47} = 5 \cdot 10^{-10} : 10^2 = 5 \cdot 10^{-12} \text{ watios/cm}^2$$

$$P_{47} = 0,45 : 10 = 0,045 \text{ barias}$$

$$V_{47} = 112 : 10 = 11,2 \text{ micras/cm.}$$

Utilizando las curvas de igual sensación, se pueden transformar sensaciones en intensidades subjetivas, es decir, decibelios en fonios.

En otras ocasiones se expresan las energías relativas al nivel de 1 microwatio/cm², y para poder realizar transformaciones utilizando este nivel damos la tabla del Cuadro 10.

Vemos, por ejemplo, en ella que una señal de —58 dB sobre 10^{-6} watios/cm² a 500 c/s le corresponden 30 fonios, y que una nota de 125 c/s y —41 dB sobre el mismo nivel produce la misma intensidad subjetiva de 30 fonios.

Para valores no señalados en la tabla puede interpolarse linealmente.

CUADRO 10

Frecuencia de c/s	31,25	62,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Dintel de audibilidad	—22	—44	—60	—75	—89	—92	—95	—93	—80	—39
10 fonios ...		—37	—53	—67	—77	—82	—85	—83		
20 » ...		—32	—46	—58	—67	—72	—75	—74		
30 » ...		—28	—41	—52	—58	—62	—65	—64		
40 » ...		—25	—36	—45	—49	—52	—55	—54		
50 » ...		—20	—31	—37	—40	—42	—44	—45		
60 » ...		—15	—24	—28	—30	—32	—34	—35		
70 » ...		— 8	—17	—19	—21	—22	—24	—24		
80 » ...		— 1	— 7	— 9	—11	—12	—14	—15		
Sensación ...	+8	+21	+32	+38	+42	+42	+36	+27	+16	+4

Percepción de los ruidos. Se consideran como ruidos todas aquellas perturbaciones acústicas de frecuencias variables caracterizadas por no producir impresiones musicales. Generalmente son desagradables. A veces, una sucesión de ruidos generados a un ritmo especial puede dar una sensación de composición musical (golpes sobre listones de madera de diversa longitud).

El problema de la impresión subjetiva producida por un sonido puro ya acarreaba dificultades, así que si se trata de un sonido complejo o de un ruido, el problema entrañará dificultades mucho mayores.

Puede considerarse como intensidad subjetiva producida por un sonido complejo, a la suma de las intensidades que producen cada uno de los sonidos puros constitutivos. Esto no es absolutamente cierto, y existen conclusiones debidas a distintas hipótesis que tampoco se ajustan a la realidad, tal como suponer con BARKHAUSEN que los componentes de energía acústica inferior al componente principal no cooperan a producir intensidad subjetiva.

De todas formas se pueden medir sus energías acústicas medias utilizando sonómetros. Un sonómetro está formado por un micrófono de alta calidad, unido a un amplificador que comprende una red de filtros, de modo que el conjunto ofrece una sensibilidad análoga a la del oído humano.

Para hacer las lecturas se conecta al amplificador un aparato de medida unido a un detector cuadrático y de constante de tiempo

CUADRO 11. Ruido de Londres, según Davis

Fonios	En el hogar	Salas de Fiestas	Calle	Vehículos
120–100				Aeroplano
100–70	Música aparato de radio fuerte	Música fuerte Gritos	Perforadora pneumática Bocina de automóvil Circulación intensa	Metro Tranvía
70–40	Locutor hablando Música radio suave Sonería de reloj	Música moderada Conversación	Circulación media Calle tranquila de Londres	Tren con ventanas abiertas Coche salón de tren a 33 km/hora
40–0	Jardín tranquilo	Restaurante tranquilo	Calle tranquila de Banlieu	

Escala (izquierda): Ruido de calle céntrica (90–70); Circulación de Londres (70–50); Ruido de Restaurante (50–40); Residencia tranquila (30–10).

Escala (derecha): Cabina de aeroplano (110–70); Estación de metro y coche entrando (90–70); Trenes, tranvías, autobús (70–40).

Umbral de audibilidad

próximo a 200 milisegundos. En el Cuadro 11 hemos indicado una serie de ruidos de la vida ordinaria, midiendo sus niveles en fonios.

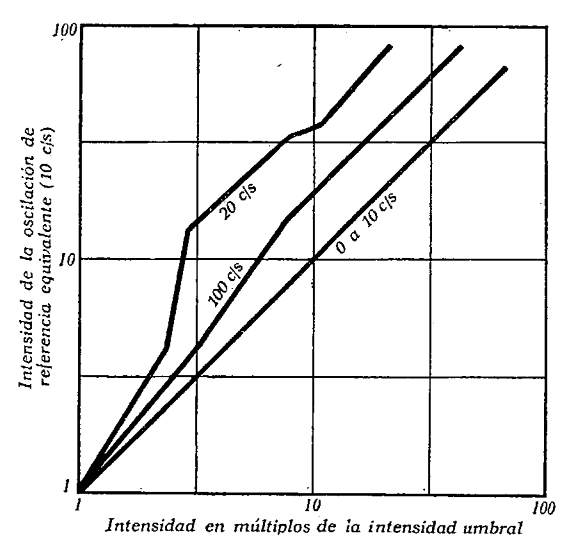


FIG. 133

Percepción táctil de vibraciones. Cuando un movimiento vibratorio es de frecuencia inferior a 16 c/s y, sin embargo, su intensidad es suficiente, puede llegar a producir en el oído una sensación de cos-

quilleo o dolor. Si se trata de un objeto material que vibra: una máquina, el pavimento, etc., se puede percibir el fenómeno de vibración por medio del tacto.

Para comparar dos sensaciones producidas por vibraciones de la misma frecuencia, se aplica la ley de Weber-Fechner, y ponemos, por tanto,

$$N_s = 20 \log_{10} \frac{A_2}{A_1}, \tag{92}$$

N_s decibelios de sensación táctil, igual a 20 veces el log. de la relación de amplitudes.

Si queremos comparar vibraciones de distinta frecuencia hay que seguir un proceso análogo al utilizado para las impresiones acústicas. Aquí se toma como frecuencia de referencia diez ciclos/segundo.

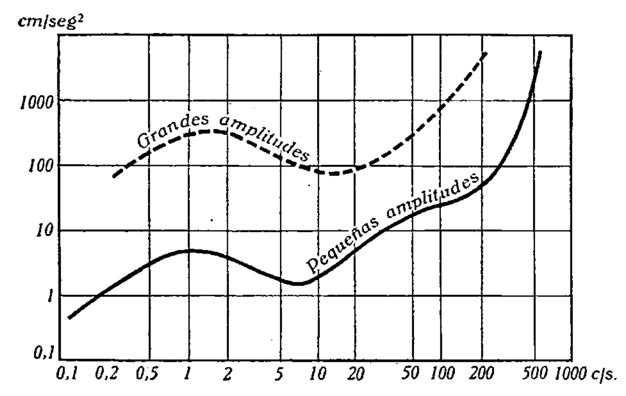


Fig. 134. Curvas de igual sensación táctil

Békésy, que ha dedicado gran atención al estudio de estas cuestiones, ha llegado a conclusiones muy interesantes reflejadas en una serie de ábacos que reproducimos.

En la figura 133 se observa la relación existente entre la sensación y la frecuencia de las vibraciones con respecto a la sensación de referencia de 10 c/s. Debemos decir que la amplitud que produce una sensación táctil umbral para la frecuencia de 10 c/s, es de 5 micras, aproximadamente.

Se observa en la figura 133 que una vibración de amplitud 10 veces la umbral y de frecuencia 20 c/s, produce una impresión táctil subjetiva igual a 60 veces la impresión que produciría una vibración de la misma amplitud y de la frecuencia de referencia (10 c/s.); se observa también que para conseguir esa misma impresión, pero a 100 c/s, se precisa una intensidad 40 veces mayor que la umbral.

Las vibraciones de excesiva amplitud actúan sobre las terminaciones nerviosas como polarizando su misión de captación, y por eso es corriente observar divididas en dos grupos las curvas que repre-

sentan peculiaridades de estos fenómenos: para pequeñas y grandes amplitudes. En la figura 134 se observan las curvas de igual sensación táctil en función de la frecuencia. En ordenadas se han colocado los valores máximos de las aceleraciones de la vibración en lugar de las amplitudes, pero fácilmente se pueden conocer éstas, ya que:

$$\text{aceleración} = j = -A\,\omega^2 = -A \cdot 4 \cdot \pi^2 f^2.$$

Cuando un fenómeno vibratorio actúa durante un tiempo largo sobre las terminaciones nerviosas táctiles, adormece la facultad de percepción; BÉKÉSY ha trazado las curvas de la figura 135, donde se observa la variación de la sensación de tacto en función del tiempo que dura el estímulo. Se ha llevado en ordenadas las excitaciones expresadas en múltiplos de la excitación umbral, correspondiendo a los tiempos de aplicación que se cuentan en el eje de abscisas.

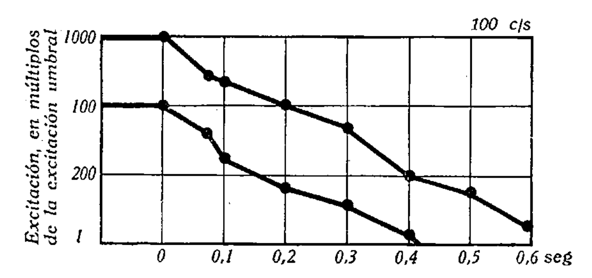


FIG. 135. Variación de la intensidad de la sensación en función del tiempo de excitación

Unidades de medida. Las unidades logarítmicas de medida que expresan las relaciones o niveles de energía de vibración, etc., respecto a una señal fija, se llaman «pal» y «Vibro», correspondientes con el concepto de decibelio y el fonio acústicos.

En los «vibros» debe tenerse en cuenta que la frecuencia de referencia es 10 c/s, y podemos poner entonces:

$$N_{\text{vibros}} = 20 \log_{10} \frac{A_{10}}{A_u} \qquad (93)$$

o sea:

$$N_{\text{vibros}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{\text{amplitud de una vibración de 10 c/s que produciría la misma sensación táctil}}{\text{amplitud de la señal umbral}}$$

A_u repetimos es de 0,005 milímetros para 10 c/s de frecuencia.

Ultrasonidos. Los ultrasonidos son vibraciones longitudinales elásticas de frecuencia más elevada que la de los sonidos; no impresionan nuestro órgano auditivo.

El límite inferior de la vastísima gama que ellos ocupan se ha fijado en los 20 000 c/s. En efecto, de la curva de sensibilidad del oído normal se deduce que el límite superior de audibilidad se halla próximo a los 20 000 c/s, mientras que el límite inferior está en los 16. Por debajo de éstos se encuentra otra gama: la de los presonidos.

El límite superior de los ultrasonidos viene dado por la imposibilidad, hoy en día, de producir vibraciones longitudinales elásticas de frecuencia superior a los 100 millones de c/s (fig. 136).

Los ultrasonidos se clasifican en:

1.° Ultrasonidos de baja frecuencia desde 2×10^4 a 10^5 c/s.
2.° Ultrasonidos de frecuencia media desde 10^5 a 10^6 c/s.
3.° Ultrasonidos de alta frecuencia, más de 10^6 c/s.

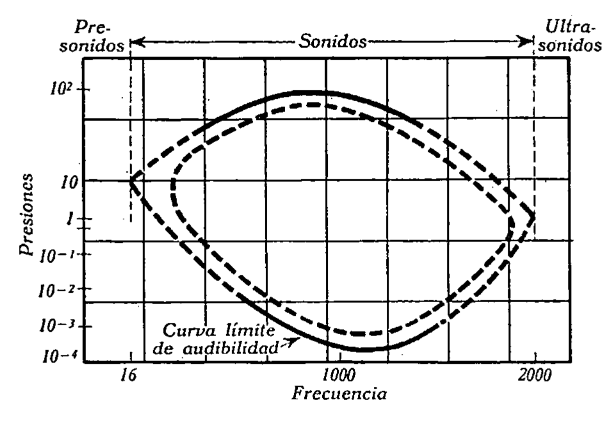


Fig. 136

Algunos de estos campos de la gama de los ultrasonidos tienen características propias que los hacen particularmente utilizables por un determinado sector de la técnica moderna.

La longitud de onda de estas vibraciones elásticas a la frecuencia de 20 000 c/s en el aire, en el agua y en el acero, es, respectivamente, de:

1,66 cm para el aire,
7,30 cm para el agua,
25,50 cm para el acero,

mientras que a la frecuencia de 10^8 c/s la longitud de onda es de:

3,3 μ para el aire,
12,6 μ para el agua,
51 μ para el acero.

De estos datos se deduce que los ultrasonidos que la técnica moderna puede producir tienen una longitud de onda que varía desde

un máximo de algunas decenas de centímetros hasta un mínimo del orden de las decenas de micrón.

Las principales propiedades físicas de los ultrasonidos son:

a) La velocidad de propagación de los ultrasonidos en un medio dado está expresada por la fórmula

$$V_1 = \sqrt{\frac{K}{d_0}}$$

en la que K es la constante elástica y d_0 la densidad del medio.

Para el aire y la temperatura de 0° C, es de 331 m/s; para el agua de mar a 4° C, es de 1470 m/s, y para el acero, de 5050 m/s.

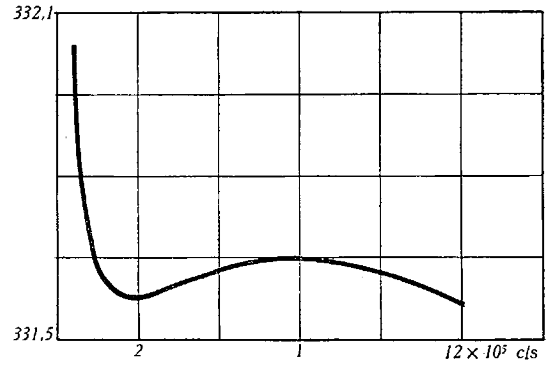


Fig. 137

Según Pierce, la velocidad de la onda ultrasonora en el aire varía, aunque en pequeña escala, con la frecuencia, según la curva de la figura 137.

Como indica la fórmula anterior, la velocidad puede variar en un medio no perfectamente uniforme por una variación de la den-

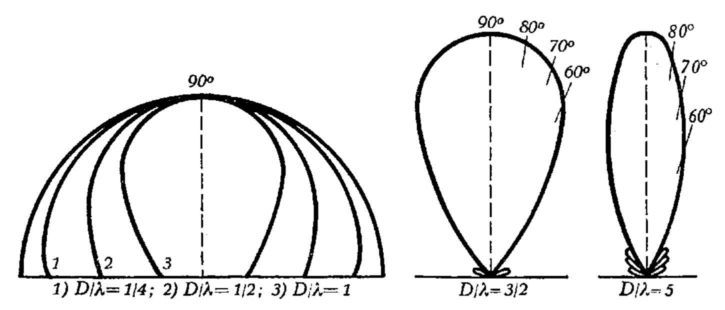


Fig. 138

sidad o de la constante elástica K, que es, a su vez, función inversa del coeficiente de compresibilidad y función directa de la razón entre el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante.

b) La propagación de los ultrasonidos para un mismo diámetro D del manantial emisor, aumenta su directividad al aumentar la frecuencia.

Los diagramas de radiación de la energía ultrasonora varían, según se indica en la figura 138, al aumentar la razón $\frac{D}{\lambda}$.

Si llamamos a al ángulo de apertura del cono de emisión en que está comprendido más del 90 por 100 de la energía ultrasonora, aquella variación está expresada por la fórmula

$$\text{sen}\, a = 1{,}22\, \frac{\lambda}{D}$$

c) La absorción aumenta con el cuadrado de la frecuencia f y con el coeficiente de viscosidad η, y disminuye con la densidad. El coeficiente de absorción a_1 está expresado por la fórmula

$$a_1 = \frac{16\, \pi^2\, f^2\, \eta}{3\, v_1^2\, d_o}$$

La ley de propagación de la energía ultrasonora, en el caso de ondas planas, viene dada por la fórmula

$$W_x = W_o \cdot e^{-a_1 x},$$

en la que W_o es la energía inicial, e es la base de los logaritmos neperianos, a_1 el coeficiente de absorción, y x la distancia del manantial al punto en que se mide la energía W_x. Esta ley muestra una disminución exponencial de la energía al crecer la distancia.

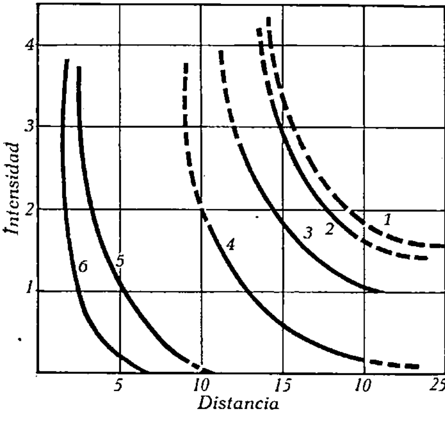


Fig. 139

Puesto que la energía transmitida por una lámina vibrante al medio en que está sumergida es proporcional al cuadrado de la amplitud de las vibraciones y al cuadrado de la frecuencia, se comprende que con los ultrasonidos sea posible transmitir al medio en que tiene lugar la propagación una energía superior a la que es transmisible con los sonidos y crecientes en razón cuadrática con la frecuencia. Como se ve, hay una oposición entre esta última propiedad y la enunciada anteriormente, por lo que deberá existir para cada medio una frecuencia «óptima», con lo cual se podrá obtener el máximo alcance.

Para dar una idea más precisa y real de cuanto hemos dicho, podremos agregar que mientras la intensidad de una onda sonora producida por el disparo de un cañón tiene un valor del orden de la $^1/_{1000}$ de watio por cm², la intensidad que con los ultrasonidos se puede transmitir es del orden de 10 watios por cm², es decir, 10 000 veces mayor.

En contraste con esto, y a causa de la absorción (particularmente en los gases), medios malos conductores pueden resultar opacos a los ultrasonidos. Éste es el caso del anhídrido carbónico para frecuencia del orden de 10^6.

GROSSMAN, experimentando sobre varios gases (aire, anhídrido carbónico y anhídrido sulfuroso), ha podido comprobar que existen frecuencias características en que la absorción es mayor y no cumplen la ley ya enunciada.

La curva 1 de la figura 139 muestra la variación teórica de la intensidad en función de la distancia, mientras que las curvas 2, 3 y 4 corresponden al aire anhídrido sulfuroso y anhídrido carbónico, a la frecuencia de 63 000 c/s, y las 5 y 6 son las de este último gas a las frecuencias de 99 500 y 177 800 c/s. Si la estructura de la molécula del gas es tal que algunos constituyentes de la misma pueden desplazarse con respecto al resto de la energía sonora, para determinadas frecuencias, pasa en gran parte de la onda a la molécula, aumentando enormemente la absorción y disminuyendo en la misma escala el alcance. Además, la presencia del vapor acuoso tiene una gran influencia sobre la absorción de los ultrasonidos en el aire.

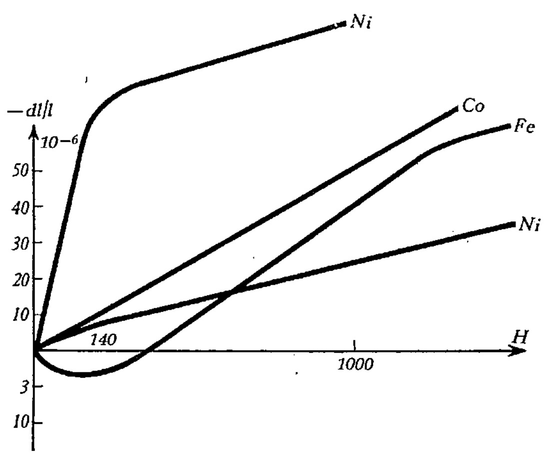


FIG. 140. Diagrama que explica el fenómeno de magnetoestricción

En el agua, que es poco compresible, los efectos de la viscosidad son mucho menos sensibles que en el aire, y la absorción, para una misma frecuencia, es 1000 veces menor que en este último medio. Ello explica la utilización de estas vibraciones elásticas en el mar, no habiéndose encontrado análoga utilización en el aire y habiendo fracasado las tentativas llevadas a cabo en este sentido.

Los ultrasonidos, además de estar sujetos a una absorción por parte del medio en que tiene lugar la propagación, análogamente a cuanto se verifica para las radiaciones luminosas, experimentan los fenómenos de reflexión y de refracción.

Los generadores de ultrasonidos se dividen en tres categorías: mecánicos, térmicos y eléctricos.

Al primer término pertenecen la sirena y la rueda fónica; al segundo, los generadores de arco, en condiciones particulares de modulación, y al tercero, el más importante, los que utilizan los fenómenos

piezoeléctricos y de magnetoestricción. Una cuarta categoría la ofrece la Naturaleza en ciertas especies de insectos y pájaros que viven en nuestras latitudes. Pacientes investigaciones de PIERCE y LITTLE han demostrado que el grillo emite ultrasonidos de frecuencias próximas a los 32 000 c/s. El canto del petirrojo posee algunas notas de frecuencia superior a 15 000 c/s.

Fué LANGEVIN quien primero pensó en utilizar las propiedades piezoeléctricas del cuarzo para generar, transmitir y recibir vibraciones ultrasonoras de cierta potencia.

Un transmisor se compone, en general, de un oscilador maestro que asegura una estabilidad casi absoluta en la frecuencia, uno a dos pasos de amplificación, y después el oscilador ultraacústico de placa de cuarzo sólidamente unida a otra de acero, en contacto ya con el medio en el que se han de propagar las oscilaciones elásticas.

Puesto que los fenómenos piezoeléctricos y de magnetoestricción son reversibles, los receptores de ultrasonidos estarán constituídos, en primer lugar, por el mismo aparato que sirva para la transmisión, seguido del amplificador y de un sistema óptico y mecánico para detectar estas vibraciones.

Receptores de ultrasonidos especiales son el radiómetro, que, como su nombre indica, puede medir la intensidad de una emisión ultrasonora, y el micrófono de condensador.

Por las características físicas ya señaladas, es en el campo marítimo en donde se han obtenido resultados verdaderamente interesantes en la exploración de los barcos sumergidos y de la profundidad de los mares.

Pero para obtener estos resultados ha sido preciso construir un mosaico con multitud de plaquitas de cuarzo, talladas todas normalmente al eje óptico, dispuestas de manera que las caras de una misma polaridad coincidan en un mismo lado, constituyendo un conjunto, dando origen a vibraciones elásticas de valor notable, aunque con tensiones, en las armaduras de este condensador (placa de acero y dieléctrico de cuarzo), del orden del millar de voltios.

Ha sido preciso, además, utilizar los fenómenos de resonancia aplicando al mosaico de cuarzo una frecuencia últimamente ligada a su espesor con el fin de obtener la máxima deformación mecánica. Sin esta precaución hubieran sido precisos más de 50 000 voltios para obtener vibraciones de amplitud equivalente. Por su gran rendimiento, los aparatos de este tipo son hoy día usados en casi todos los barcos, tanto de guerra como mercantes.

La propiedad directiva de los ultrasonidos hace seguro y preciso su empleo. En cambio, la falta de directividad en los sonidos de frecuencia audible ha hecho imposible, o por lo menos muy difícil, su aplicación a la determinación de la profundidad marina en la proximidad de las costas o de bancos subacuáticos por los falsos ecos que se originan.

Sondas que emitían sonidos para la determinación de la profundidad del mar obtenían resultados precisos para más allá de los 50 metros;

pero si se considera que las profundidades inferiores a esos 50 metros son las que más interesa conocer para la seguridad de la navegación, se comprende que las ondas a base de ultrasonidos hayan venido a substituir a las primeras.

Desde hace quince años se va extendiendo poco a poco el oscilador ultrasonoro a magnetoestricción, que se basa en la variación de las propiedades magnéticas de ciertos materiales (níquel y sus aleaciones con el hierro y acero, cobalto, etc.), sometidos a esfuerzos mecánicos, fenómeno que, como el piezoeléctrico, es reversible.

El oscilador a magnetoestricción se alimenta también con un transmisor de válvula, y la potencia obtenible está limitada por la fuerte corriente parásita que se desarrolla por la acción del campo magnético, alternativo excitador. En la práctica es posible obtener con un campo magnético de $5{,}10^7$ webers por centímetro cuadrado una fuerza alternativa de $30 \cdot 10^2$ gr por centímetro cuadrado, cien veces mayor que la que se puede obtener con un oscilador piezoeléctrico, teniendo, además, el oscilador a magnetoestricción las ventajas de su solidez, simplicidad y menor volumen, circunstancias todas dignas de tenerse en cuenta.

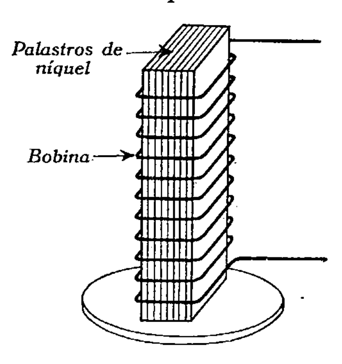


FIG. 141. Principio de aparato productor de ultrasonidos por magnetoestricción

Los aparatos utilizados hace algunos años trabajaban con una frecuencia de 10 a 35 Kc/s. Hoy lo hacen con frecuencias menores a fin de disminuir la absorción y, por consecuencia, tener un mayor alcance. Un sistema combinado de dos transmisores, uno ultrasonoro y otro radiotelegráfico, puede facilitar la entrada de los buques en los puertos.

El transmisor ultrasonoro situado en tierra transmite señales particulares, constituídas por una o más letras repetidas varias veces, separadas por intervalos de silencio, siguiendo después un trazo continuo de bastante duración, y, por último, una señal de un quinto de segundo.

El transmisor radio, en el instante de la emisión de esta última señal, emite otra del tipo de las señales radiohorarias.

La nave que quiere entrar en el puerto, provista de un receptor ultrasonoro orientable, busca la dirección de máxima intensidad de la emisión ultrasonora, y recibe la señal de radio, determinando la diferencia de tiempo que media entre ésta y la señal ultrasonora, emitida en el mismo instante, dato con el que halla la distancia al puerto, y, con la dirección, le permite fijar su posición en el mar.

Los ultrasonidos en la metalurgia. Las aplicaciones más importantes en este campo se deben a SOKOLOFF, que ha utilizado los ultrasonidos para investigar los defectos internos de un metal.

El aparato utilizado para ello consta de un transmisor de ultrasonidos que emite un haz de ondas a través del aceite contenido en una cubeta en contacto con el metal que se quiere examinar, según una cierta dirección. En el otro extremo hay otra cubeta con aceite que recibe las vibraciones ultrasonoras y es atravesada por un haz luminoso de rayos paralelos, los cuales son concentrados por una lente y proyectados sobre una pantalla situada en el plano focal de la lente.

Si el metal está libre de imperfecciones y es homogéneo, los ultrasonidos que lo atraviesan no sufren desviaciones o absorciones anormales. Si, por el contrario, existen vacuolas, fisuras o zonas no homogéneas, la propagación, en el metal, de los ultrasonidos viene modificada, y el punto luminoso revela inmediatamente el defecto.

Los ultrasonidos en la química. De la misma manera que en metalurgia, en el campo de la química se pueden obtener, mediante la acción de los ultrasonidos, mezclas íntimas de dos o más substancias. Así logró MARINESCO mezclar metales de bajo punto de fusión con agua, alcohol, aceite y parafina, obteniendo verdaderas disoluciones coloidales. La acción de los ultrasonidos debe atribuirse a la presión ejercida en la zona de separación de los dos medios.

En el campo de la galvanoplastia y de las emulsiones fotográficas resulta evidente, de cuanto se ha dicho, que la acción mecánica de los ultrasonidos puede conducir a una finura de los depósitos no alcanzada por ningún otro método. Estas emulsiones mejoran en homogeneidad y estabilidad, aumentando la concentración de la plata, la finura del material sensible y el poder resolutivo de la emulsión. En la fabricación de la película fotográfica, los ultrasonidos acortan el tiempo de precipitación del bromuro de plata, de algunos días a unos cuantos minutos.

Las máximas presiones y depresiones en un haz de ultrasonidos están localizadas en los vientres de una onda, y ahí se produce la liberación de los gases disueltos en un líquido. La burbuja de gas liberado se sitúa en el nodo más próximo y, cuando ha engrosado suficientemente, se desprende.

Los ultrasonidos en la biología y en la medicina. La acción de los ultrasonidos sobre las bacterias, células y tejidos vivos está ligada a la acción mecánica, química y térmica ya citada.

Esta acción puede seguirse, en casos particulares, con el microscopio. Elementos celulares sumergidos en el líquido agitado por los ultrasonidos sufren movimientos rapidísimos que se transmiten en su interior, acabando por destruirse si su intensidad o duración sobrepasan ciertos límites o si a la acción mecánica se agrega una acción química o térmica que cause la descomposición o la rotura violenta.

CAPÍTULO II

Electroacústica arquitectural

(Estudio de la reverberación)

Generalidades. Los sonidos musicales y la palabra están formados por un conjunto de vibraciones acústicas que deben llegar a nuestro oído en un orden determinado para que apreciemos su calidad y nos formemos idea de lo que quieren expresarnos. Cuando el foco perturbador y el observador están al aire libre y en espacio libre de obstáculos, la llegada es en el orden adecuado, pero cuando se trata de un local cerrado, como hay reflexiones en las paredes del mismo puede ocurrir que lleguen al mismo tiempo al oído del observador sonidos producidos en tiempos distintos, unos por el camino directo y otros después de varias reflexiones. Si esto ocurre, se pierde inteligibilidad en la audición de la palabra y la música se «funde».

Si cesa el foco sonoro en un instante cualquiera, no por eso se dejan de percibir sonidos, sino que éstos llegan al observador durante un intervalo de tiempo, siendo el vehículo las ondas reflejadas, y entonces decimos que existe reverberación.

A primera vista parece que la reverberación es perjudicial y que para acondicionar un local acústicamente debía eliminarse al máximo las reflexiones hasta que no hubiese efecto reverberante; sin embargo, esto no es cierto, ya que entonces nos parecería la música poco brillante y la habitación «muerta». Esto es debido a que estamos acostumbrados a escuchar todos los sonidos con algo de reverberación, y si al escucharlos otra vez no se producen en un «clima» análogo, nos parecen falsos y anormales. Es preciso, por tanto, acondicionar los locales dosificando en ellos la reverberación según los efectos que se quieren conseguir.

Vamos a estudiar este fenómeno para llegar a las consecuencias teóricas y prácticas necesarias.

Reverberación en un recinto. Teoría de Sabine. SABINE encontró después de numerosas investigaciones y experiencias en la Universidad de Harvard la fórmula

$$T = 0{,}16 \frac{V}{\Sigma\, a_i\, S_i} \quad ,, \qquad (94)$$

que da el tiempo de reverberación — intervalo de tiempo transcurrido entre el momento que cesa el foco sonoro y que deja de escucharse el sonido — en función de:

V = volumen de la sala en metros cúbicos.
S_i = superficie de un trozo de la sala, en metros cuadrados.
a_i = coeficiente de absorción de dicha parte.

Esta fórmula da buenos resultados en muchos casos, y se toma como clásica. Vamos a deducirla y después a comentar las hipótesis hechas.

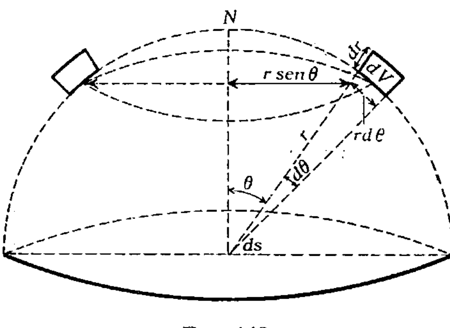


Fig. 142

Debe considerarse que, por tratarse de un recinto cerrado, las ondas parten del foco perturbador en todas direcciones, incidiendo en las paredes y techo bajo todos los ángulos posibles. Al cabo de algún tiempo — desde luego, corto —, y después de numerosas reflexiones, se puede considerar que existe una distribución uniforme y difusa de energía caracterizada por ser en cada unidad de volumen igual a I, y desplazándose en todas direcciones con la velocidad v_1 de propagación del sonido. De esto se deduce que el flujo medio de energía será independiente del punto elegido y de la orientación del elemento de superficie, y que la energía total existente en el recinto es

$$VI$$

Consideremos un elemento dV de volumen que tiene la energía IdV; esta energía se desplaza en todas direcciones, y contemos la que llega a un elemento de superficie dS (fig. 142).

El ángulo sólido según el cual se ve dV desde dS, considerando el elemento de volumen colocado en la superficie esférica de radio r, es

$$d\Omega = \frac{\cos\theta \cdot dS}{r^2};$$

la energía que llegará a dS procedente de dV, será

$$IdV \cdot \frac{\cos\theta\, dS}{r^2}$$

Para sumar toda la energía que en un tiempo dt llega a dS procedente de los elementos contenidos en una semiesfera, se tendrá presente:

a) El radio de la esfera debe ser $v \cdot dt$, siendo v la velocidad de propagación del sonido.

b) Todos los elementos de volumen que forman el mismo ángulo θ en la normal a dS, están contenidos en un toro cuya sección normal vale

$$r \cdot d\theta \cdot dr,$$

y cuyo círculo principal tiene un contorno

$$2\,\pi\, r \operatorname{sen} \theta.$$

El volumen de este toro se puede poner en la forma

$$dV_{Ti} = 2\,\pi\, r \operatorname{sen} \theta \cdot r \cdot d\theta\, dr = 2\,\pi\, r^2 \operatorname{sen} \theta\, d\theta\, dr,$$

y la energía que llega a dS procedente de él:

$$I\, 2\pi\, r^2 \operatorname{sen} \theta \frac{\cos \theta\, dS}{4\pi\, r^2}\, d\theta \cdot dr = \frac{1}{2} \cdot I \operatorname{sen} \theta \cos \theta\, d\theta\, dr\, dS.$$

Integrando la expresión anterior entre los límites $0 \to v\,dt$,, $0 \to \frac{\pi}{2}$ encontraremos la energía buscada, pues sumaremos todos los toros comprendidos en la semiesfera:

$$I_{dV} = \frac{1}{2} \int_0^{vdt} IdS \cdot dr \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \operatorname{sen} \theta \cos \theta\, d\theta = \frac{I\, v\, dS\, dt}{4} \quad ,, \qquad (95)$$

Si llamamos α_i al coeficiente de absorción de la substancia de que está construído un determinado trozo de pared de superficie S_i del recinto, la energía acústica que absorbe el local será

$$\frac{Iv}{4}\, \Sigma \alpha_i\, S_i\, dt,$$

y eso será a la vez la variación de energía en el recinto; luego:

$$d\,(VI) = -\frac{Iv}{4}\, \Sigma\, \alpha_i\, S_i\, dt$$

ecuación diferencial que, ordenada, queda en la forma

$$\frac{dI}{dt} + \frac{v_1\, \Sigma\, \alpha_i\, S_i}{4\,V}\, I = 0,$$

y cuya solución es

$$I = I_o\, e^{-\frac{v_1\, \Sigma \alpha_i\, S_i}{4\,V} t}, \qquad (96)$$

siendo I_o la densidad de energía existente en el momento que cesa de funcionar el foco sonoro, y que vale

$$I_o = \frac{4\,E}{v_1\, \Sigma \alpha_i\, S_i} \quad ,, \qquad (97)$$

expresión en la que E significa la energía del foco sonoro.

Tomando logaritmos decimales:

$$t = \frac{4\ V}{v_1\ \Sigma a_i\ S_i \times 0{,}434} \cdot \log \frac{I_o}{I}$$

y sustituyendo valores y tomando el tiempo para el cual la relación $\frac{I_o}{I}$ vale 10^6, que es lo que se llama tiempo de reverberación:

$$T = 0{,}16 \cdot \frac{V}{\Sigma a_i\ S_i} \text{ (la 94 ya indicada)}$$

V está expresado en metros cúbicos, y $\Sigma a_i\ S_i$ es el producto de metros cuadrados por los números abstractos que significa a_i, obteniéndose T en segundos.

Crítica de la teoría de Sabine. En la deducción que hemos hecho se supone que llegábamos a una distribución uniforme de energía en

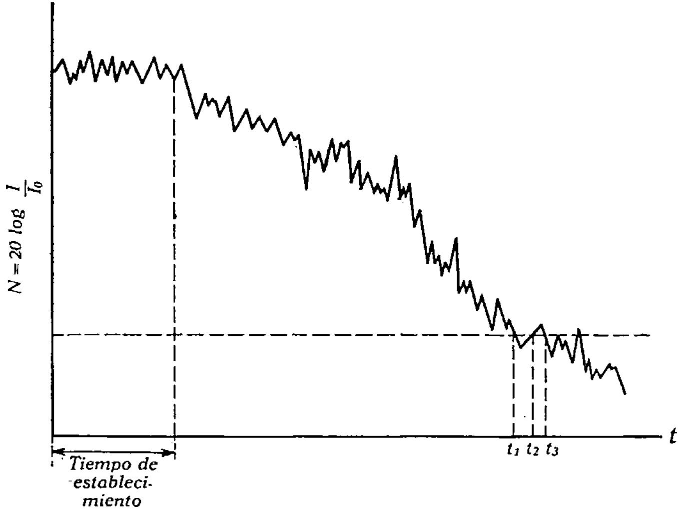


Fig. 143

todos los puntos del recinto, y esto sólo se conseguirá cuando las paredes sean poco absorbentes y sólo desaparezca el sonido al cabo de muchas reflexiones.

Tampoco se ha tenido en cuenta la posición relativa de foco y observador, cosa que evidentemente debe tenerse presente, pues hay ángulos de la habitación donde no se puede hacer la integración en la forma realizada.

También se observa que al obtener prácticamente por medio de medidas las curvas de variación de la relación $\frac{I_o}{I}$ en función del

tiempo (fig. 143), hay varios instantes para los cuales la relación tiene un mismo valor (instantes t_1, t_2, t_3 para $20 \log \frac{I_0}{I} = 60$ dB), lo cual nos demuestra la no existencia de una distribución difusa.

Para obtener una fórmula que responda más fielmente al fenómeno, y siguiendo un razonamiento más riguroso, debemos observar el recorrido que siguen los rayos sonoros.

Un rayo cualquiera irá reflejándose sucesivamente, y en cada reflexión seguirá un camino de longitud diferente; sin embargo, si el número de reflexiones es considerable, puede demostrarse que hay un valor de recorrido medio.

Supongamos un recinto de forma esférica y un foco sonoro F del cual parte un rayo que se refleja sucesivamente en los puntos A, B, etc. (fig. 144). El valor de recorrido medio será el valor medio de todas las cuerdas que se pueden trazar desde F. Sea FA una cuerda cualquiera que forma un ángulo con el diámetro. El número total de cuerdas que partiendo de F forman ese mismo ángulo, está representado por el área de la superficie anular rayada, que vale

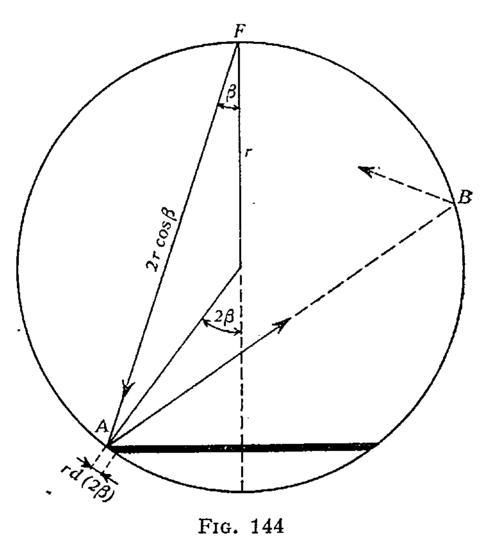


FIG. 144

$$2\pi \operatorname{sen} 2\beta\, r \cdot d\,(2\beta);$$

como la cuerda tiene una longitud $2r \cos \beta$, se tendrá como valor de recorrido medio:

$$l_m = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2\pi \operatorname{sen} 2\beta\, r \cdot d\,(2\beta) \cdot 2\, r \cos \beta}{\text{superficie esfera}} = \frac{\frac{16}{3}\pi r^3}{S} = \frac{4\,V}{S}\,, \qquad (98)$$

Llamaremos a al coeficiente de absorción del material con que se ha construído el recinto, la intensidad que queda después de una reflexión será

$$I - Ia = I\,(1 - a)\,,$$

y después de N reflexiones $I\,(1 - a)^N$, si en este instante llegamos a la intensidad 10^6 veces menor, tendremos

$$(1 - a)^N = 10^{-6},$$

expresión en la que N es evidentemente el número de reflexiones verificadas en el tiempo de reverberación.

Como el número de reflexiones realizadas por segundo es

$$n = \frac{\text{velocidad de propagación}}{\text{camino medio}} = \frac{v}{\frac{4\,V}{S}} = \frac{v\,S}{4\,V} \qquad (99)$$

tendremos

$$T = N/n = \frac{\frac{-6 \log_e 10}{\log_e (1 - \alpha)}}{\frac{v\,S}{4\,V}} = 0{,}16 \frac{V}{-S \log_e (1 - \alpha)} \;,, \qquad (100)$$

Se observa una diferencia con la fórmula de Sabine, ya que el denominador, que expresa la absorción, en lugar de ser

$$A = S\alpha$$

viene expresado por

$$A' = S \log_e (1 - \alpha).$$

Esta deducción se ha hecho suponiendo que el material absorbente que recubre el recinto tiene un coeficiente único. En la práctica, los recintos están formados por trozos de superficie de distinto coeficiente de absorción, y así, la absorción total viene expresada simbólicamente por

$$A_T = \Sigma\, S_i \log_e (1 - \alpha_i) \;,, \qquad (101)$$

con lo cual el tiempo de reverberación se puede expresar en la forma

$$T = \frac{0{,}16\ V}{S_1 \log_e (1 - \alpha_1) + S_2 \log_e (1 - \alpha_2) + \ldots} \;,, \qquad (102) \;,,$$

siendo α_1 el coeficiente de absorción correspondiente a la superficie S_1, etc.

La importancia de la fórmula (100) estriba en que, ajustándose más a la realidad, ahorra material absorbente, ya que para obtener un determinado tiempo de reverberación se necesita menos superficie absorbente, pues el factor $\log_e (1 - \alpha)$ es mayor que α:

$$\log_e (1 - \alpha) = \frac{\alpha}{1} + \frac{\alpha^2}{2} + \frac{\alpha^3}{3} \ldots\ldots > \alpha.$$

Medida de los tiempos de reverberación. Los procedimientos de medida del tiempo de reverberación de los locales pueden ser teóricos y prácticos.

Los métodos teóricos solamente se utilizan para darnos una idea de magnitud y para que nos sirvan de dato de avance al realizar un proyecto; luego se realizan las medidas con aparatos especiales y se modifican los valores de las superficies absorbentes hasta conseguir el tiempo de reverberación deseado.

La fórmula 102 ó 94 permite el cálculo de este tiempo siempre que se conozcan los coeficientes de absorción de las superficies.

Para la medida de T, SABINE colocaba en el recinto cuatro órganos, dispuestos de forma que no se influenciaran entre sí. Al cabo de un tiempo de funcionamiento de los órganos — cuando existe una distribución aproximadamente difusa de energía —, se obliga que cesen los órganos en su funcionamiento y emisión de energía acústica,

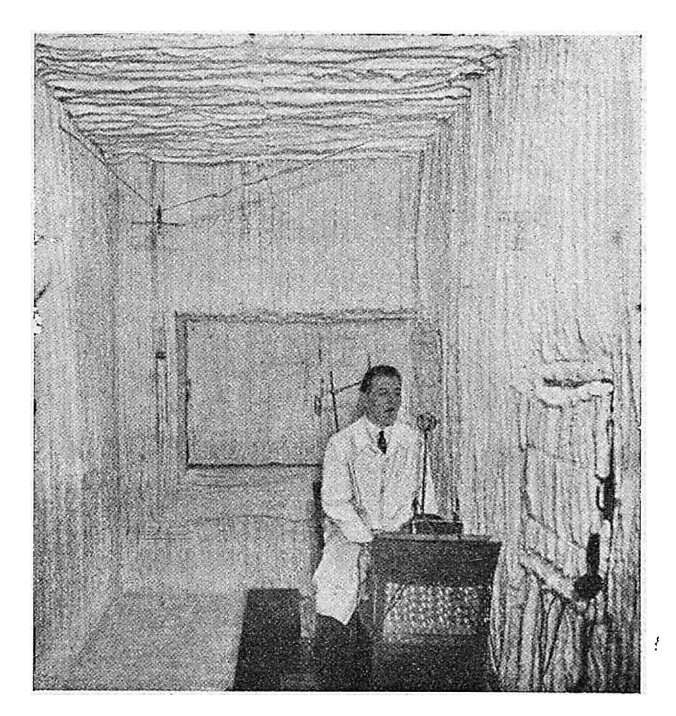


FIG. 145. Habitación acondicionada para medida de ondas progresivas

y un observador pone en marcha un cronómetro que para cuando deja de oír (se llega a la energía correspondiente al límite de audibilidad); el cronómetro mide el tiempo de reverberación.

En este método, además de los inconvenientes e imperfecciones propios de la falta de automatismo, debe tenerse en cuenta que el dintel de audibilidad no es fijo para cada observador ni para cada frecuencia, con lo cual será preciso hacer un gran número de medidas con varios observadores y tomar un valor medio.

Hay métodos semiautomáticos que dan resultados muy precisos, y para los cuales se requieren los siguientes aparatos:

Un tocadiscos con «pickup» conectado a un amplificador — altavoz —, un cronómetro eléctrico y un potenciómetro graduado en nepers o en decibelios. Se utiliza como foco sonoro el altavoz que reproduce las señales grabadas en un disco. Estas señales están consti-

tuídas por un conjunto de frecuencias variables en un margen estrecho y que se repiten a un ritmo rápido, constituyendo lo que se denomina un «aullador».

El utilizar estas señales especiales tiene por objeto el que no se formen ondas estacionarias, lo que ocurriría si se utilizase una frecuencia única, y, por tanto, podrían enmascararse los resultados de las medidas desfavorablemente.

El procedimiento de medida es: Se regula el potenciómetro a 60 dB por encima del dintel de audibilidad y se conecta el amplifica-

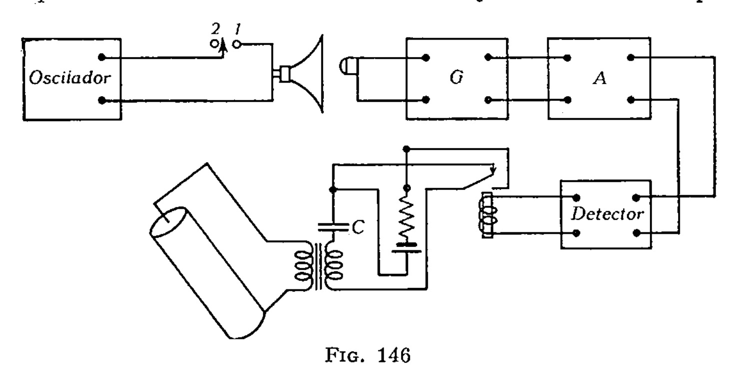


Fig. 146

dor. Cuando lleva el altavoz funcionando un minuto, se interrumpe su funcionamiento y entonces se pone en marcha el cronómetro, parándose cuando el sonido es imperceptible.

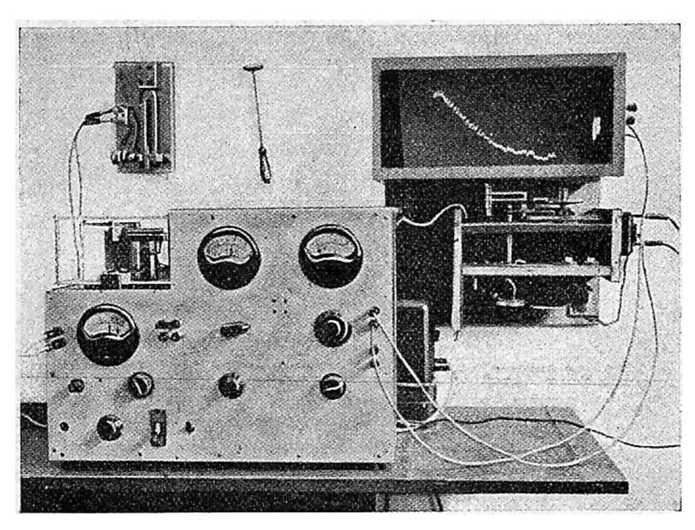
Se repiten las experiencias con el potenciómetro regulado a 50, 40, etc., decibelios, contándose los nuevos tiempos; así es fácil encontrar la relación lineal que liga los niveles en decibelios y los tiempos de escucha, de forma que la pendiente de esa recta es el tiempo de reverberación buscado.

Este método también tiene los inconvenientes inherentes a toda apreciación subjetiva, y por eso se han buscado procedimientos totalmente automáticos que registren en escalas logarítmicas el proceso total de la reverberación. Vamos a describir a continuación la instalación de los laboratorios Bell (fig. 146), que sigue ese procedimiento.

Consta de un oscilador conectado a un amplificador cuya salida puede llevarse o no — según se quiera — al altavoz; delante del altavoz está el micrófono *M* de respuesta lineal, unido a un amplificador con un atenuador que puede regular la ganancia en distintos pasos de variación, en decibelios.

La salida del amplificador se lleva a un detector cuya salida alimenta un relé marginal, la armadura del cual puede producir la descarga del condensador *C*; a continuación se encuentra acoplado un dispositivo contador formado por un tambor sobre el que se arrolla un papel. Estando encendido el oscilador perturbador y, por tanto, el micrófono excitado, tendremos el relé recorrido por una corriente continua

como consecuencia de la acción del detector. En este momento, el condensador C se carga. Al cabo de unos momentos, cuando se estima que ya existe una distribución de energía lo más uniforme posible, se pasa



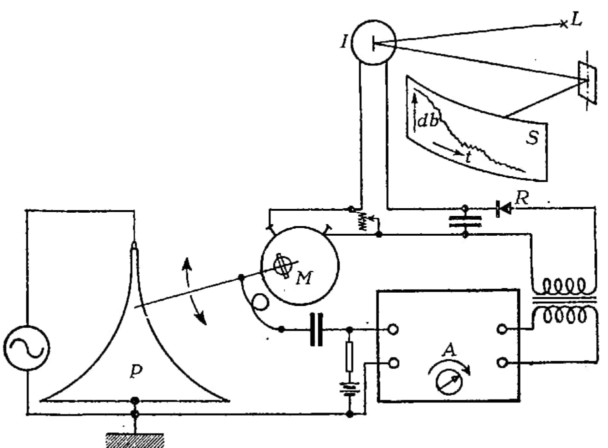


FIG. 147. Esquema de principio y aspecto del aparato para medidas de reverberación con registro de los niveles sucesivos

el conmutador a la posición 2, con lo cual deja de funcionar el altavoz. En ese mismo instante se ha puesto en marcha el cilindro contador. Cuando el micrófono es excitado por una energía equivalente a la del dintel de audibilidad, el relé marginal desprende su armadura, descargándose el condensador C. La tensión de descarga produce por medio de la bobina de Ruhmkorff una tensión entre el punzón P y la masa del

cilindro, perforándose el papel de la escala. De este modo, y en función de la velocidad de giro del cilindro, se puede calcular el tiempo transcurrido entre el arranque y el instante en que se produjo la perforación.

Como regular el relé marginal, para que se desprenda cuando llega al micrófono la señal umbral, es sumamente complicado y difícil, se

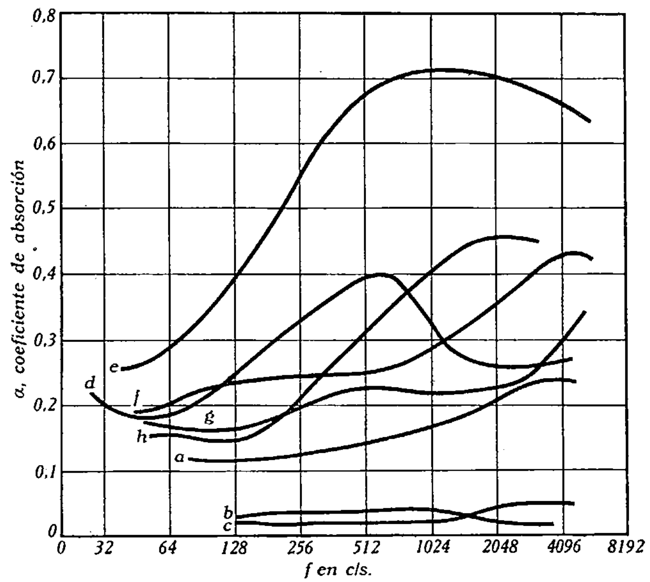


Fig. 148. Variación del coeficiente de absorción con la frecuencia: *a*, tabique de ladrillos; *b*, vidrio; *c*, pared con enlucido de yeso; *d*, enlucido de yeso sobre metal; *e*, vitrofix; *f*, celotex especial; *g*, celotex *B*; *h*, insulite

recurre a medir con el aparato descrito la absorción total del local y aplicar después la fórmula 96 ó 102. Más adelante describiremos cómo se mide la absorción.

Aparatos más modernos trazan las curvas de la densidad media de energía en función del tiempo y en escala logarítmica (fig. 147).

Materiales absorbentes. Para conseguir tiempos de reverberación adecuados se recubren las paredes de los recintos de materiales especiales con coeficientes de absorción diversos. En la absorción total del local intervienen, además, los objetos, mobiliario, personas que constituyen el auditorio, etc. Pretendemos ahora solamente enumerar los materiales absorbentes más corrientes y los procedimientos para medida de sus coeficientes.

Los materiales absorbentes industriales suelen ser aglomerados de substancias fibrosas vegetales o minerales que reciben nombres diversos. Todas estas substancias, y fundamentalmente las porosas, para frecuencias menores que la propia, debido a la elasticidad peculiar que poseen, se comprimen y absorben por rozamiento. Los poros hacen

un efecto de tubo, y por eso deben tener una dimensión adecuada, pues si su tamaño es comparable con la longitud de onda del sonido, originan en sus conductos ondas estacionarias, no produciendo absorción.

Los coeficientes de absorción de las distintas substancias dependen de la frecuencia, según se observa en los ábacos de la figura 148.

CUADRO 12

Material	Coeficiente de absorción a		
	512 c. p. s.	1024 c. p. s.	2048 c. p. s.
Ventana abierta	1	1	1
Hormigón: relación del mortero 1 : 3 cemento - arena	0,43	0,37	0,39
Calacoustic 5 mm espesor	0,16	0,21	0,35
Sabinita 12 mm espesor	0,214	0,29	0,34
Acoustex 25 mm espesor	0,55	0,73	0,64
Acoustex 40 mm espesor	0,68	0,82	0,63
Acoustic-Celotex perforado	0,25	0,23	0,23
Acoustic-Celotex tipo B	0,47	0,53	0,62
Celotex normal 17 mm espesor	0,20	0,20	0,19
Insulita 17 mm espesor	0,28	0,29	0,32
Madera de pino en hojas 20 mm espesor	0,14	0,15	0,15
Fieltro ignífugo Asbestos 10 mm espesor	0,35	0,30	0,23
Fieltro de pelo y Asbestos	0,38	0,55	0,46
Fieltro de yute 12 mm espesor	0,17	0,48	0,52
Fieltro de yute 25 mm espesor	0,54	0,63	0,57
Sillas, muebles, etc	0,17	0,18	0,20
Alfombra 12 mm espesor sobre hormigón	0,21	0,26	0,27
Entarimado de pino	0,06	0,09	0,10
Aglomerado de corcho en paneles de 25 mm espesor	0,40	0,25	0,34

Un estudio más teórico de los materiales absorbentes obliga a considerarlos divididos en dos clases:

a) Materiales porosos no flexibles.

b) Materiales no porosos flexibles.

De acuerdo con esto deben considerarse tres características en todo material: el espesor, su resistencia, y la porosidad, cuyo conjunto determina su comportamiento acústico.

La porosidad se define como la relación entre el volumen de aire existente en la masa de la substancia y el volumen total del sólido; la resistencia, como la relación entre la diferencia de presión entre el principio y fin del trozo de substancia, dividido por la velocidad de la corriente de aire.

El cociente de la diferencia de presión en barias y de la velocidad en centímetros/segundo son unidades de resistencia llamados ohmios mecánicoacústicos, y a este tipo de resistencia se le llama resistencia-flow.

Utilizando como parámetros la porosidad y $\eta = \frac{r}{\omega \varrho_0}$ (expresión en la que r es la «resistencia-flow» y ϱ_0 la densidad de la substancia) se puede hallar el coeficiente de absorción de cualquier material para distintas frecuencias, utilizando los ábacos de la figura 149.

CUADRO 13

Material	Coeficientes de absorción a las frecuencias					
	128	256	512	1024	2048	4096
Pared de ladrillo de 45 cm de espesor sin pintar	0,024	0,025	0,031	0,042	0,049	0,070
Pared de ladrillo de 45 cm de espesor, pintada	0,012	0,013	0,017	0,020	0,023	0,025
Enlucido de yeso sobre baldosa.	0,013	0,015	0,020	0,028	0,040	0,050
Enlucido de yeso sobre madera, espesor 12 mm, superficie rugosa	0,023	0,039	0,039	0,052	0,057	0,035
Enlucido de yeso sobre madera, espesor 15 mm, superficie lisa.	0,029	0,026	0,032	0,041	0,048	0,035
Enlucido de yeso sobre metal, espesor 15 mm, superficie lisa..	0,020	0,022	0,032	0,039	0,039	0,028
Enlucido de cal sobre madera, espesor 12 mm, superficie rugosa.	0,039	0,056	0,061	0,089	0,054	0,070
Enlucido de cal sobre madera espesor 15 mm, superficie lisa .	0,035	0,033	0,031	0,039	0,023	0,041
Paneles de madera, 12 mm espesor	0,100	0,110	0,100	0,080	0,080	0,110
Alfombra de goma de 5 mm espesor sobre suelo de cemento ..	0,040	0,040	0,080	0,120	0,030	0,100
Alfombra linoleum sobre cemento.			0,030			
Suelo de losetas de corcho.....	0,040	0,030	0,050	0,110	0,070	0,020
Alfombra de 9 mm de espesor sobre suelo cemento...........	0,090	0,080	0,210	0,260	0,270	0,370
Alfombra forrada de fieltro de 12 mm espesor sobre suelo cemento....................	0,110	0,140	0,370	0,430	0,270	0,270
Colgadura de algodón de 10 onzas por yarda cuadrada colgada en contacto directo con la pared.	0,040	0,050	0,110	0,180	0,300	0,440
Colgadura de algodón de 14 onzas por yarda cuadrada, colgada en contacto directo con la pared.	0,060	0,080	0,130	0,230	0,400	0,440
Colgaduras de terciopelo de 18 onzas por yarda cuadrada, colgadas a 10 cm de la pared...	0,009	0,330	0,450	0,520	0,500	0,440
Colgaduras idénticas a las anteriores pero a 20 cm de la pared..	0,120	0,360	0,450	0,520	0,500	0,440
Fieltro de 25 mm espesor......	0,130	0,410	0,560	0,690	0,650	0,490
Celotex *B* de 16 mm espesor.	0,080	0,180	0,480	0,630	0,750	—
» *B* de 22 mm » .	0,280	0,300	0,450	0,510	0,580	0,570
» *BB* de 20 mm » .	0,150	0,240	0,620	0,760	0,730	—
» *BB* de 30 mm » .	0,370	0,440	0,680	0,760	0,750	0,670
» *BBB* de 30 mm » .	0,180	0,330	0,840	0,970	0,760	—

Existe una estrecha relación entre el valor de la absorción acústica que produce una substancia y el ángulo de incidencia del rayo sonoro sobre el material. En la figura 150 se observa perfectamente este fenómeno.

Métodos de medida de la absorción y de los coeficientes de absorción. Existen diversos procedimientos para la determinación de la cons-

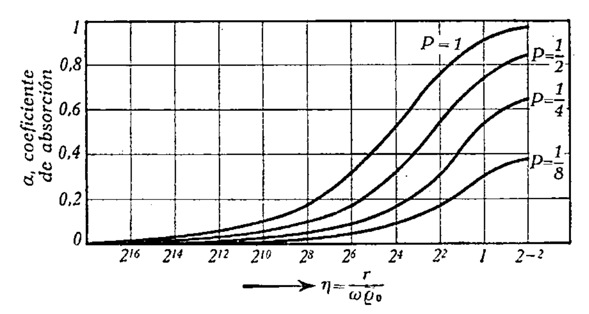


FIG. 149. Coeficiente de absorción en función de la porosidad P, resistencia r y pulsación ω

tante de los materiales absorbentes; los más sencillos son consecuencia de la medida de la absorción total realizada en determinados recintos preparados para estas pruebas.

Utilizando el aparato de los laboratorios Bell anteriormente descrito, se calculan perfectamente las absorciones; bastará para ello

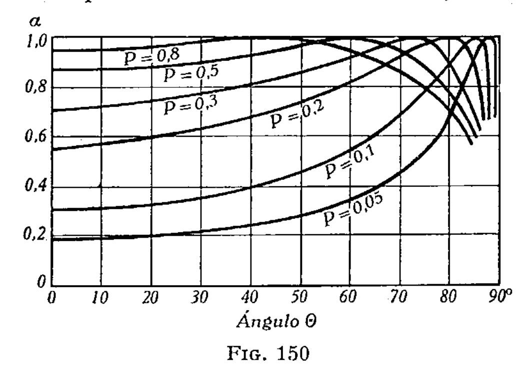


FIG. 150

hacer dos medidas. Si llamamos E_1 a la tensión aplicada al relé cuando éste atrae su armadura y E_d a la tensión marginal que produce el desprendimiento, al cabo de un tiempo t_1 se tendrá, si es G_1, la ganancia del amplificador, y A_1, la atenuación introducida en decibelios:

$$G_1 - A_1 = 20 \log_{10} \frac{E_1}{E_d} \quad ,,$$

para otro valor del atenuador:

$$G_1 - A_2 = 20 \log_{10} \frac{E_2}{E_d} \quad ,,$$

Las densidades de energía acústica en uno y otro caso serán propor-

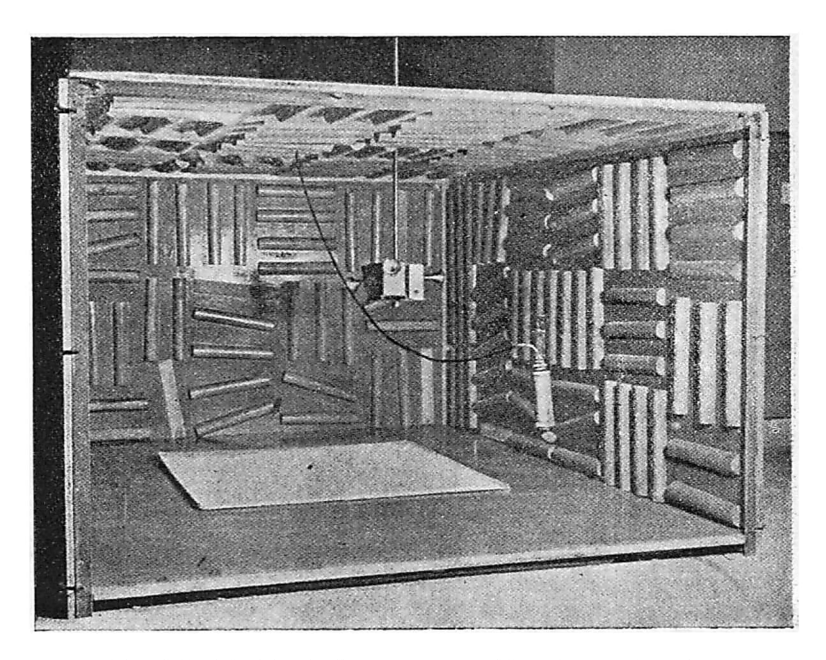


FIG. 151. Modelo de cámara para medidas de reverberación

cionales a los cuadrados de los voltajes de señal del micrófono, o sea, a los aplicados al relé, con lo cual:

$$20 \left[\log_{10} \frac{E_1}{E_d} - \log_{10} \frac{E_2}{E_d} \right] = 10 \left[\log_{10} \frac{I_1}{I_d} - \log_{10} \frac{I_2}{I_d} \right] =$$

$$= 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_2} = A_2 - A_1$$

después de la fórmula 96 podemos poner:

$$10 \log_{10} \frac{e^{-\frac{v_1 \Sigma a_i S_i}{4V} t_1}}{e^{-\frac{v \Sigma a_i S_i}{4V} t_2}} = 10 \log_{10} e^{-\frac{v_1 \Sigma a_i S_i (t_1 - t_2)}{4V}} = A_2 - A_1$$

y despejando $\Sigma a_i S_i$, a lo que se llama absorción total igual a a_T,

$$a_T = 0{,}92 \frac{V}{v} \cdot \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} \quad ,, \qquad (103)$$

Una vez conocida la absorción total del local, puede sustituirse un trozo de superficie absorbente, cuyo coeficiente y área es conocido, por un panel de las mismas dimensiones de la substancia, cuyo coeficiente queremos determinar. Medida la nueva absorción total a'_T se tendrá

$$a_T = a'_T + S(\alpha' - \alpha), \quad \text{o sea,} \quad \alpha' = \alpha + \frac{a_T - a'_T}{S} \;,, \qquad (104)$$

Transmisión del sonido entre locales. Si se tienen dos locales A y B separados por una pared MN que los hace físicamente independientes, pueden quedar acoplados acústicamente según tres principios distintos.

Si en A producimos una perturbación acústica mediante un foco sonoro f (fig. 166), al incidir las ondas sonoras en MN puede ocurrir:

1.° Que sea porosa MN, con lo cual A y B están en comunicación y llegará el sonido a este último recinto.

2.° Que MN sea más o menos rígida, con lo cual se comportará como un radiador de más o menos eficacia, transmitiendo la perturbación acústica al local B.

Para expresar matemáticamente la importancia de la transmisión del fenómeno acústico entre dos recintos, se define el «coeficiente de transmisión» como la relación entre el flujo de energía que llega al recinto acoplado y el flujo de energía incidente sobre el elemento superficial que sirve de acoplamiento:

$$T = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \;,, \qquad (105)$$

Si llamamos:

I_a a la densidad media de energía en el recinto A,
I_b a la densidad media de energía en el recinto B,
V_a al volumen del recinto A,
V_b al volumen del recinto B,
S a la superficie de la pared MN,

se obtiene como ecuación que liga el decrecimiento de la densidad de energía en ambos recintos:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dI_a}{dt} + \frac{v_1 \Sigma a_i S_i}{4 V_a} I_a - T \frac{v_1 S}{4 V_a} I_b = 0 \\ \frac{dI_b}{dt} + \frac{v_1 \Sigma a_i S'_i}{4 V_b} I_b - T \frac{v_1 S}{4 V_b} I_a = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (106)$$

Considerando los casos habituales en los cuales por ser T pequeño,

la perturbación que sufre A por causa de B es despreciable, quedará el sistema en la forma más simplificada:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d\,I_a}{dt} + \frac{v_1 \Sigma\, a_i\, S_i}{4\, V_a}\, I_a = 0 \qquad (107)\,'' \\ &\frac{d\,I_b}{dt} + \frac{v_1 \Sigma\, a'_i\, S'_i}{4\, V_b}\, I_b - T\,\frac{v_1\, S}{4\, V_b}\, I_a = 0 \qquad (108) \end{aligned}\right\} (^1)$$

(1) La deducción es la siguiente: despejando I_a en la (108), se tiene

$$I_a = \frac{4\, V_b}{v_1\, S T}\left[\frac{d\, I_b}{dt} + \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i\, I_b}{4\, V_b}\right] \qquad (109')$$

y derivando

$$\frac{d\, I_a}{dt} = \frac{4\, V_b}{v_1\, S T}\left[\frac{d^2\, I_b}{dt^2} + \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i \cdot v_1}{4\, Vb} \cdot \frac{d\, I_b}{dt}\right]$$

que, llevando a la (107) '':

$$\frac{4\, V_b}{v_1\, S T}\left[\frac{d^2\, I_b}{dt} + \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i \cdot v_1}{4\, V_b} \cdot \frac{d\, I_b}{dt}\right] + \frac{v_1 \Sigma\, a_i\, S_i}{4\, V_a} \cdot \frac{4\, V_b}{v_1\, S T}\left[\frac{d\, I_b}{dt} + \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i \cdot v_1\, I_b}{4\, V_b}\right] = 0$$

$$\frac{d^2\, I_b}{dt^2} + \frac{v_1}{4}\left(\frac{\Sigma\, a_i\, S_i}{V_a} + \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i}{V_b}\right)\frac{d\, I_b}{dt} + \frac{v_1^2}{16} \cdot \frac{\Sigma\, a_i\, S_i \cdot \Sigma\, a'_i\, S'_i}{V_a\, V_b}\, I_b = 0$$

y siendo la solución de esta ecuación diferencial:

$$I_b = P\, e^{-\beta_1\, t} + Q\, e^{-\beta_2\, t} \qquad (110')$$

en la que β_1 y β_2 son las raíces de la ecuación característica, que valen:

$$\beta_1 = \frac{-\frac{v_1}{4}\left(\frac{\Sigma\, a_i\, S_i}{V_a} + \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i}{V_b}\right) + \sqrt{\frac{v_1^2}{16}\left[\frac{\Sigma\, a_i\, S_i}{V_a} + \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i}{V_b}\right] - \frac{v_1^2}{4} \cdot \frac{\Sigma\, a_i\, S_i \cdot \Sigma\, a'_i\, S'_i}{V_a\, V_b}}}{2} =$$

$$= -\frac{v_1}{4} \cdot \frac{\Sigma\, a_i\, S_i}{V_a}$$

$$\beta_2 = -\frac{v_1}{4} \cdot \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i}{V_b}$$

I_a valdrá:

$$I_a = \frac{4\, V_b}{v_1\, S T}\left[P\, e^{-\frac{v_{1i} \Sigma\, a\, S_i}{4\, V_a}\, t}\left(\frac{v_1 \Sigma\, a'_i\, S'_i}{4\, V_b} - \frac{v_1 \Sigma\, a_i\, S_i}{4\, V_a}\right) + \right.$$

$$\left. + Q\, e^{-\frac{v_1 \Sigma\, a'_i\, S'_i}{4\, V_b}\, t}\left(\frac{v_1 \Sigma\, a_i\, S_i}{4\, V_a} - \frac{v_1 \Sigma\, a'_i\, S'_i}{4\, V_b}\right)\right]$$

como para $t = 0$ la densidad media de energía en régimen permanente es I_o '', y como

$$I_b = \frac{I_o\, S\, T}{\Sigma\, a'_i\, S'_i}$$

se pueden determinar P y Q:

$$P = I_o\, \frac{S\, T}{\Sigma\, a_i\, S_i} \cdot \frac{\Sigma\, a'_i\, S'_i\, V_a}{(\Sigma\, a'_i\, S'_i\, V_a - \Sigma\, a_i\, S_i\, V_b)}$$

$$Q = -I_o\, \frac{S\, T}{\Sigma\, a'_i\, S'_i} \cdot \frac{\Sigma\, a_i\, S_i\, V_b}{(\Sigma\, a'_i\, S'_i\, V_a - \Sigma\, a_i\, S_i\, V_b)}$$

valores que, sustituídos en la (110'), permiten hallar I_b '' y como consecuencia de (109') se halla I_a, según hemos indicado en (109 y 110).

Integrando este sistema se llega a las expresiones que dan los valores de la densidad media de energía en los recintos A y B al cabo de un tiempo t de cesar en su funcionamiento la fuente de energía, y siendo I_o el valor de la densidad media que había en el recinto A cuando cesó el foco:

$$I_a = I_o\, e^{\frac{-v_1 \Sigma a_i S_i}{4 V_a} t} \tag{109}$$

$$I_b = I_o \frac{S\,T}{(\Sigma a'_i S'_i V_a - \Sigma a_i S_i V_b)} \times$$

$$\times \left[\Sigma a'_i S'_i V_a\, e^{-\frac{v_1 \Sigma a_i S_i}{4 V_a} t} - \Sigma a_i S_i V_b\, e^{-\frac{v_1 \Sigma a'_i S'_i}{4 V_b} t}\right] \tag{110}$$

Medida de los coeficientes de transmisión. Utilizando la teoría anterior se puede encontrar el valor de T o coeficiente de transmisión; basta proceder de un modo análogo al seguido para la determinación de los tiempos de reverberación empleando aparatos del estilo de los ya descritos al hablar de la medida de los tiempos de reverberación.

Se coloca en el recinto A (perturbador) un foco sonoro, y cuando se estima que se ha llegado a tener una densidad media permanente I, se interrumpe el funcionamiento del manantial, contando el tiempo transcurrido hasta que se tiene una densidad arbitraria; por ejemplo, la correspondiente al umbral de audibilidad. Se tendrá:

$$I_a = I_o\, e^{\frac{-v_1 \Sigma a_i S_i}{4 V_a} t_1}$$

Se repite el experimento midiendo en B, con lo cual

$$I_b = I_o \frac{S\,T}{\Sigma a'_i S'_i\,[\Sigma a'_i S'_i V_a - \Sigma a_i S_i V_b]} \times$$

$$\times \left[\Sigma a'_i S'_i V_a\, e^{\frac{-v \Sigma a_i S_i}{4 V_a} t_1} - \Sigma a_i S_i V_b\, e^{\frac{-v \Sigma a'_i S'_i}{4 V_b} t_2}\right]$$

despreciando el sustraendo del paréntesis, evidentemente de valor despreciable al lado del minuendo, igualando, se despeja:

$$T = \frac{\Sigma a'_i S'_i}{S} \left[1 - \frac{\Sigma a_i S_i V_b}{\Sigma a'_i S'_i V_a}\right] e^{\frac{-v_1 \Sigma a_i S_i}{4 V_a} (t_1 - t_2)} \tag{111}$$

$\Sigma a_i S_i$ y $\Sigma a'_i S'_i$ se determinan según se dijo, pues son las absorciones totales de A y B.

A veces, para medir los efectos de transmisión se emplean unidades logarítmicas, siguiendo el mismo proceso que se sigue en telegrafía y telefonía para evaluar pérdidas, y así se dice:

N decibelios de pérdida de transmisión acústica $= 10 \log_{10} \frac{1}{T}$.

A continuación indicamos una referencia de las pérdidas de transmisión de distintos materiales para una gama de frecuencias comprendidas entre 130 y 1100 c/s.

CUADRO 14

Materiales	Pérdidas en dB
Puerta de madera de paneles delgados	22,5
» » » » con cámara aire 5 cm	26
» » » » dura (roble), espesor 4 cm...........	25,8
» » acero, espesor 6 mm..........................	35,7
Tabique ladrillo, espesor 20 cm, enlucido yeso 2,5 cm	54,8
» ladrillo, con cámara aire (5 cm), iguales anterior. ..	57
» anterior forrado de fieltro	66
Plancha de fieltro, espesor 2,5 cm	8,1
» » » 5 cm	11,5
» » » 7,5 cm	14,5

Inteligibilidad. Cuando se proyecta acústicamente un local, se pretende que los sonidos se perciban y diferencien fácilmente por un observador.

El estudiar la inteligibilidad como fenómeno sirve para deducir los requisitos que deben reunir los locales.

Las circunstancias que motivan variación en la inteligibilidad de la voz humana que se produce en un recinto son:

a) Intensidad con que se produce.
b) Tiempo de reverberación.
c) Nivel de ruidos.
d) Forma de la sala.

Iremos pasando revista sucesivamente a estas cuestiones, y previamente vamos a indicar los procedimientos de medida de la articulación e inteligibilidad, o sea, en definitiva, la corrección con que nuestro oído interpreta el lenguaje articulado.

Para medir la inteligibilidad se dispone un operador que pronuncie grupos de palabras que constituyan frases, y otro operador las escucha, estando ambos colocados en las condiciones de lugar y posición que obligue a intervenir al dispositivo acústico o recinto cuyas condiciones se ensayan.

Estas frases, generalmente cortas, son preguntas, y con este procedimiento es fácil saber si el sentido de ellas ha sido entendido.

El tanto por ciento de preguntas bien contestadas constituye el tanto por ciento de inteligibilidad.

La articulación se mide pronunciando sílabas que aunque no tengan significación se pretende que en ellas se repitan los ruidos vocales y consonantes con la misma proporción que lo hacen en el lenguaje ordinario.

Estas listas de sílabas (logatomos) deben estudiarse convenientemente para conseguir el fin pretendido, y es evidente que deben variar de un idioma a otro. El tanto por ciento de articulación es el porcentaje de logatomos exactamente escuchados de cien sílabas pronunciadas.

Como es más cómodo realizar las pruebas de articulación —son de menor duración—, suelen realizarse éstas; sin embargo, parece que sea más normal y lógico realizar pruebas de inteligibilidad. En cada idioma es fácil ver que deben existir relaciones fijas entre ellas, y conocida la articulación se pasa a la inteligibilidad, y viceversa. En la figura 152 se observa la correspondencia entre estas características, según FECHTER, para la lengua inglesa, y en la 153 se dan características de articulación.

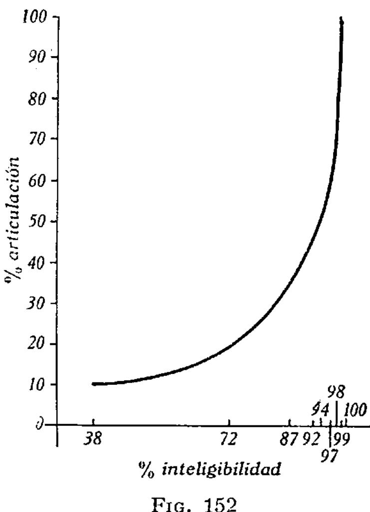


FIG. 152

Puede asegurarse que las condiciones acústicas de un local son buenas si la inteligibilidad es del 98 %, o sea, de una articulación del 85 %.

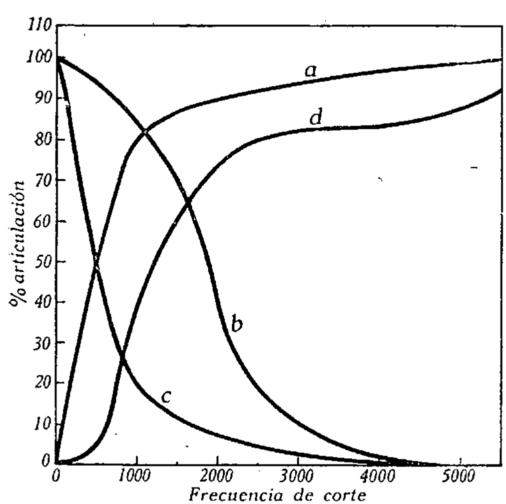


FIG. 153. Variación de la articulación al reducir la tanda de frecuencias: *a*, energía que queda en las altas frecuencias suprimiendo las frecuencias hasta la de corte que se indica; *b*, articulación suprimiendo las bajas frecuencias; *c*, energía que queda en las bajas frecuencias suprimiendo desde la de corte en adelante; *d*, articulación suprimiendo las altas frecuencias

Forma en que afecta el tiempo de reverberación a la inteligibilidad. Ya hemos indicado las causas que afectan a la inteligibilidad; la primera, o sea, el efecto debido a la intensidad con que se produce el lenguaje articulado, se pone de manifiesto de una forma inmediata cuando se sobrepasan ciertos límites. Es tanto más fácilmente identificable la conversación cuando se pronuncia con la misma intensidad a que estamos acostumbrados a escuchar. A una distancia de 30 cm del que habla, esa intensidad viene caracterizada por un valor medio de una baria. Cuando el exceso de presión varía de

un 1000 por ciento a uno y otro lado, no se percibe disminución en la inteligibilidad.

La reverberación afecta mucho más a la inteligibilidad; al superponerse los sonidos aparece un efecto de enmascaramiento, además de efectos secundarios de distorsión lineal debidos a los distintos coeficientes de absorción que presentan las paredes en función de la frecuencia.

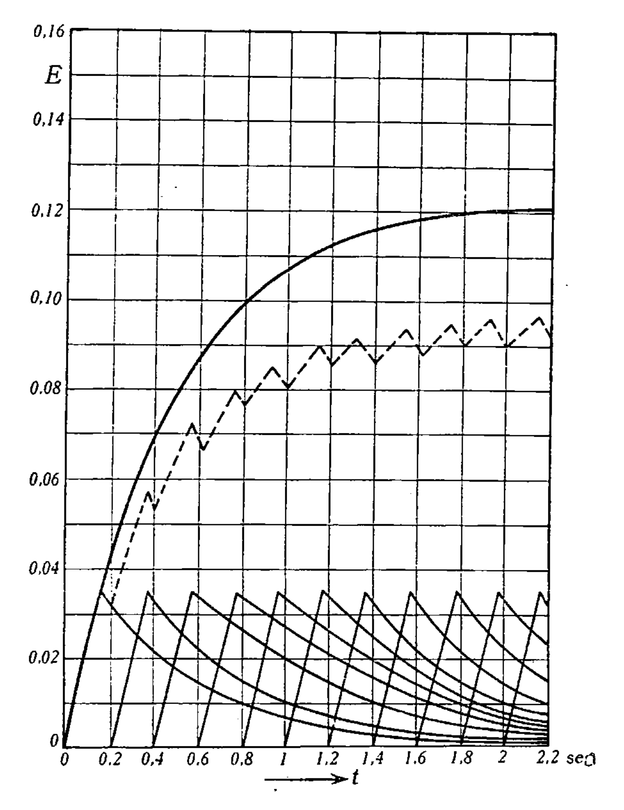


FIG. 154. Influencia de la reverberación en la inteligibilidad

En la figura 154 se observa perfectamente este fenómeno; se presenta el crecimiento y decrecimiento de sonido en un recinto de tiempo de reverberación de dos segundos. Se pronuncian grupos de sílabas de intensidad constante y duración 0,15 segundos separadas entre sí por intervalos de 0,05 segundos. Se ha dibujado la forma de establecimiento y extinción individual de cada grupo, y la curva punteada será la suma de las curvas anteriores, pudiendo representar la variación de densidad de energía.

Se observa, viendo la forma de esta curva de puntos, que aunque la intensidad en el recinto sea grande, la inteligibilidad será muy mala.

La curva llena superior significa la forma de crecimiento de la densidad de energía si el sonido se produjera de forma continua y con in-

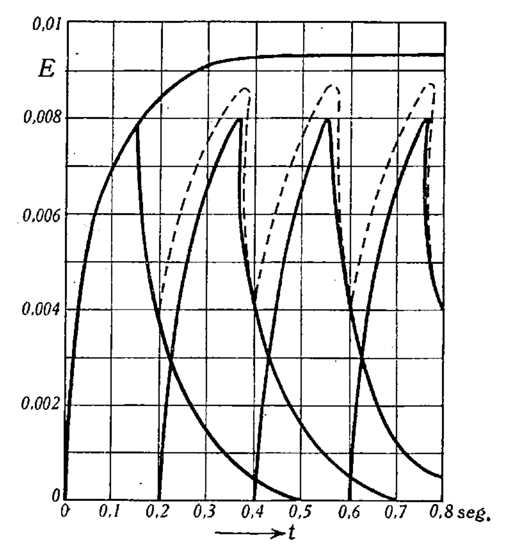


FIG. 155. Influencia de la reverberación en la inteligibilidad

tensidad constante. En la figura 155 se reflejan los resultados de la misma experiencia, realizados ahora en un recinto de tiempo de reverberación 0,3 segundos. La inteligibilidad es buena, pues la intensidad media

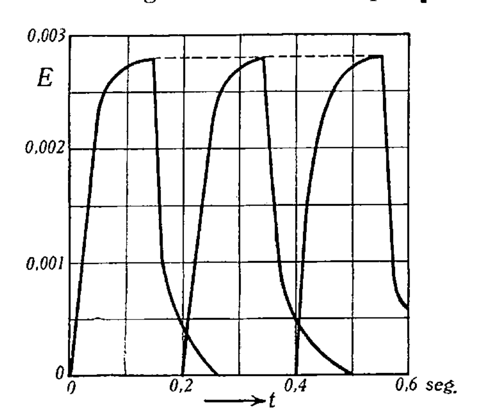


FIG. 156. Influencia de la reverberación en la inteligibilidad

no crece tanto y presenta fluctuaciones suficientes que hacen destacar los impulsos individuales de sonido. Por fin, en la figura 156 se ha reducido el tiempo de reverberación a 0,01 segundos, con lo cual los soni-

dos llegan completamente separados entre sí, y tendremos una inteligibilidad perfecta. Respecto al fenómeno reverberante, sin embargo, la intensidad es débil y el espacio es muy «muerto».

Se ha estudiado por varios autores el efecto causado por los ruidos sobre la inteligibilidad del lenguaje articulado, deduciéndose que los ruidos pequeños causan efectos de pequeña pérdida de agudeza auditiva y en nivel análogo al suyo propio, pero referidos a las frecuencias de 100 y 500 c/s. Los ruidos intensos hacen decrecer rápidamente la inteligibilidad, enmascarando de forma predominante las frecuencias altas.

CUADRO 15

Intensidad del lenguaje articulado. dB sobre el nivel umbral	% de articulación	Intensidad de ruido en dB sobre el nivel umbral	% de articulación para una intensidad de señal de 50 dB sobre el umbral	Factor Ku de Knudsen	Tiempo de reverberación	% de articulación para una intensidad de 50 dB sobre el umbral	Factor Kr de Knudsen
0	0	0	93	1	0	93	1
10	20	5	89	0,96	1	88	0,98
20	45	10	85	0,92	2	79	0,93
30	72	15	78	0,89	3	72	0,83
40	85	20	70	0,85	4	65	0,75
50	93	25	58	0,81	5	58	0,68
60	96	30	45	0,77	6	51	0,60
70	97	35	32	0,72	7	44	0,55
80	97	40	20	0,67	8	37	0,50
90	96	45	10	0,61	9	30	0,46
100	90	50	0	0,5			

La forma de la sala afecta también, y en las fórmulas empíricas que dan algunos autores para el cálculo de la articulación y en las que se tienen en cuenta los factores que hemos ido repasando, se suelen incluir coeficientes característicos tales como los que hemos denominado *Ku* y *Kr* para el caso de ruidos y reverberación y que se incluyen en las fórmulas de Knudsen.

Por último, debe tenerse en cuenta que si se transmite a través de un sistema electroacústico que produce distorsión, la inteligibilidad queda muy disminuída. Si se suprimen frecuencias bajas, por ejemplo, las inferiores a 400 c/s, aunque el lenguaje articulado queda con una calidad poco natural, no se pierde inteligibilidad; en cambio, si se suprimen las frecuencias superiores a 1500 c/s —según KNUDSEN—, la articulación se rebaja al 62 %.

Capítulo III

Diseño y acondicionamiento acústico de locales

Generalidades. Hemos visto por separado y estudiado matemáticamente los fenómenos que califican la bondad acústica de un recinto, pero no todos los locales necesitan los mismos requerimientos, sino que, según el empleo acústico que de ellos se va a hacer, se calculan de

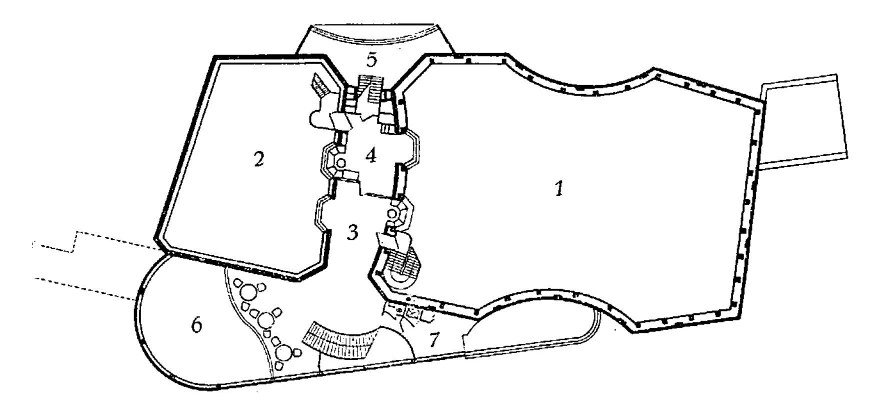


Fig. 157. Plano de las instalaciones de estudios de A. V. R. O. Se señala con 1 a la sala de conciertos, siendo 2 el estudio para música ligera o pequeñas representaciones, 3 y 4 son los puestos de control de ambos estudios, 5 es un local para servicios técnicos, 6 el vestíbulo y 7 un despacho. Obsérvese la forma especial que tiene la planta de los estudios: 1 parece el cuerpo de un violón. Ambos estudios, en la construcción, son completamente independientes

forma diferente. Después de esto se ve la necesidad de ir pasando revista a los distintos tipos de salas, para que, al estudiar cada problema particular, veamos las peculiaridades de cálculo de cada una.

Estudios de radiodifusión o para captación y registro de sonidos. Son varias las circunstancias que determinan el cálculo de estos estudios, y algunas, contradictorias, o por lo menos no coincidentes entre sí; iremos mencionando las recomendaciones más usuales, y en la práctica lo que se suele hacer es encontrar valores atendiendo a esas recomendaciones y buscar luego un número de compromiso para ellos.

Debemos decir previamente que unos estudios de Radiodifusión constan de varias salas enlazadas entre sí microfónicamente y por medio de redes telefónicas para mando. La forma y dimensiones de cada uno de estos estudios se proyecta según el tipo de programa que en ellos se realiza.

Las salas para conferenciantes y locutores son pequeñas y de formas irregulares, buscando que no haya superficies paralelas. Los tiem-

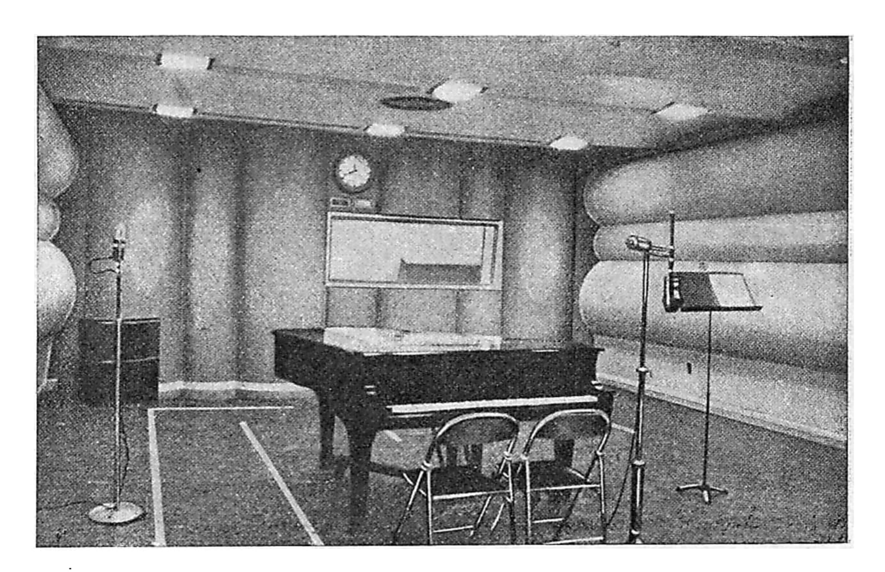


FIG. 158. Sala acondicionada para solistas y cantantes de la WLW Cincinnati

pos de reverberación deben ser cortos para que la inteligibilidad sea alta. Se recomiendan volúmenes de 20 a 40 metros cúbicos.

Los estudios grandes, donde se realizan programas musicales o radioteatro se calculan dándoles forma paralelepipédica, y dimensiones en la proporción

$$\frac{\text{alto}}{2} = \frac{\text{ancho}}{3} = \frac{\text{largo}}{5}$$

Como hay tres incógnitas y sólo dos ecuaciones, se necesita otra, que suele ser la que liga las tres dimensiones, dando el volumen de la sala.

Existen muchos criterios que determinan el volumen de los estudios. Los americanos calculan la altura h por la fórmula

$$h = 1{,}8\sqrt[3]{N + 2{,}5}\ \text{m}, \qquad (112)$$

quedando así determinadas las otras dimensiones. N es el número de ejecutantes.

La N. B. C. (National Broadcasting Corporation) adoptó para el cálculo de sus estudios el criterio siguiente:

Locutores	20 m³
Conferencias	40 »
Comedias	90 »
Actos religiosos	200 »
Música de baile y de cámara	300 »
Opereta y ópera	300 »
Música ligera	800 »
Banda y orquesta sinfónica	3400 »

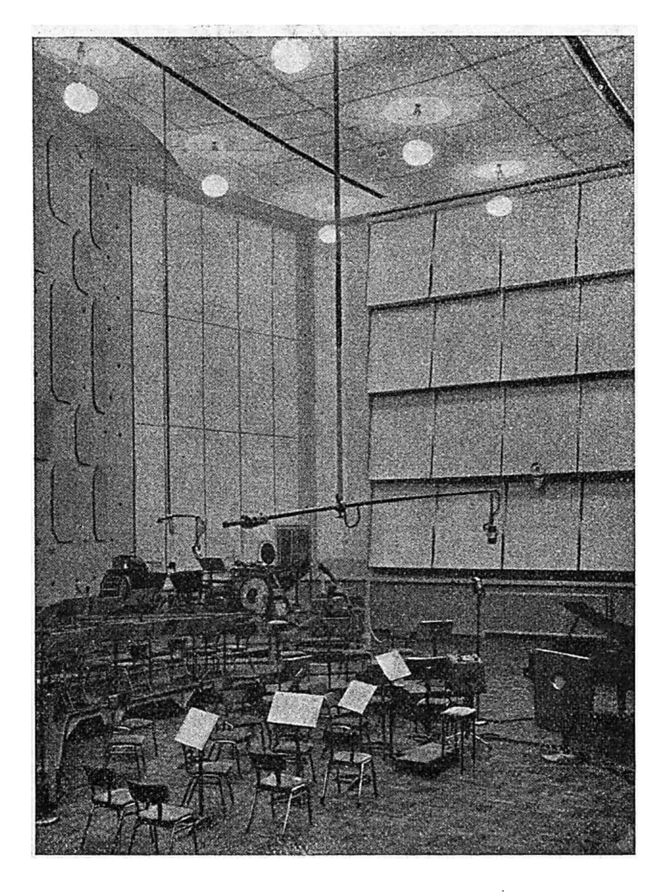


FIG. 159. Vista del estudio para música sinfónica y grandes conciertos. Obsérvense dos micrófonos suspendidos de los «rails» para orientación adecuada. Al lado del puesto de director de la orquesta se ve un tablero o pupitre de señales luminosas para recibir órdenes del puesto de control. El altavoz colocado delante del piano sirve para mezclar con la música en determinadas circunstancias ruidos de fondo especiales. Los paneles que se observan en las paredes pueden modificar las características acústicas de la sala, al girar ángulos determinados

Los estudios europeos son mayores en general, y así, la B. B. C. (British Broadcasting Corporation) calculó sus estudios atendiendo al número de ejecutantes y de acuerdo con el criterio registrado en la figura 160.

Otras recomendaciones dan el número de ejecutantes también en función del volumen por las fórmulas empíricas:

$$N = 0{,}229\ V^{3/4}\ (V \text{ esta expresado en } m^3). \qquad (113)$$

Una circunstancia muy interesante es el tiempo de reverberación propio que debe tener la sala según su volumen para que los sonidos

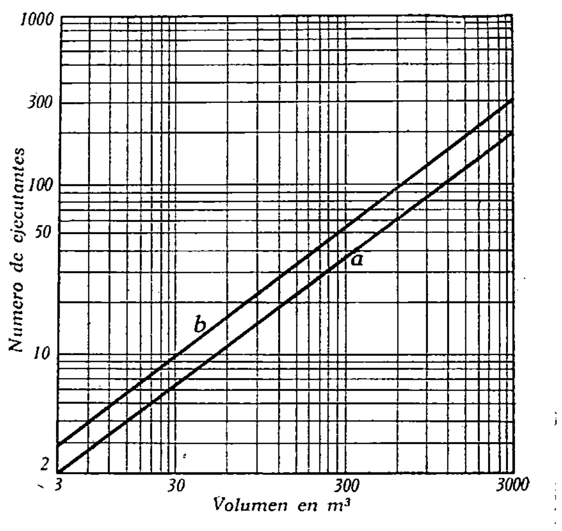


FIG. 160. *a*, número óptimo de ejecutantes; *b*, número máximo de ejecutantes permitidos

que en ella se produzcan den verdadera sensación de realidad y naturalidad. SABINE y WATSON estiman los siguientes tiempos óptimos de reverberación:

CUADRO 16

Volumen en pies cúbicos	Tiempos de reverberación aceptable, según SABINE	Tiempos de reverberación óptimos, según WATSON
50 000	1 -1,18	1
100 000	1,15-1,37	1,51
200 000	1,25-1,5	1,66
300 000	1,45-1,65	1,74
400 000	1,45-1,73	1,84
500 000	1,5 -1,82	1,89
600 000	1,57-1,90	1,92
800 000	1,7 -2,04	2,00
1000 000	1,79-2,17	2,04

Otros autores dan criterios de tiempos óptimos parecidos, según se indica en la figura 161.

Tiempo de reverberación aparente. Es interesante observar que al calcular el tiempo óptimo de reverberación no debe tenerse solamente en cuenta el volumen de la sala, sino también —y casi es más importante— el tipo de micrófono empleado, ya que por el hecho de colocarse dicho elemento en un punto del estudio se modifica este tiempo, obteniéndose lo que se llama tiempo de reverberación aparente. Obsérvese la figura 162.

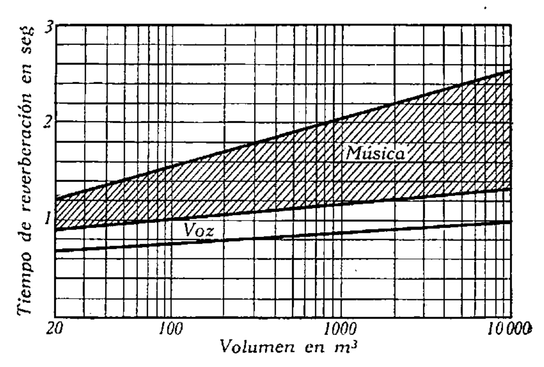


FIG. 161. Tiempos de reverberación recomendados

Las potencias acústicas o la intensidad acústica relativa varía según la frecuencia o posición del micrófono debido a las interferencias que se producen entre los sonidos directos y las ondas reverberantes, existiendo puntos para los cuales parece que se modifica el tiempo de reverberación.

Si en un punto de un local se coloca un observador, llegan a su oído ondas acústicas procedentes de todas direcciones por haberse verificado muchas reflexiones; ahora bien, como el rayo directo es el más intenso, el observador elimina subjetivamente los sonidos reflejados y parece que hay una reverberación aparente menor que la verdadera. Al micrófono le ocurre algo parecido, aunque fundado en causas distintas. Si se trata de un micrófono omnidireccional recibiría todo género de excitaciones procedentes de los distintos rayos, pero *no puede* eliminar subjetivamente los reflejados y se necesitarán salas de bajo tiempo de reverberación. Si tenemos micrófonos direccionales, éstos, si están montados convenientemente, eliminan los rayos reflejados y es como si disminuyese el

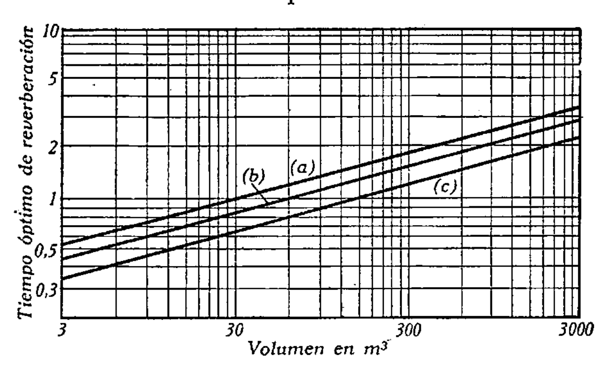


FIG. 162. *a*, se emplea micrófono direccional; *b*, se emplean micrófonos semidireccionales; *c*, se emplean micrófonos omnidireccionales

tiempo de reverberación, o sea, que para obtener el mismo efecto que en el caso anterior podrán tenerse salas menos absorbentes.

Se puede ver esto matemáticamente de la siguiente forma:

Según EYRING, la densidad media de energía en un punto P, situado a una distancia r del foco sonoro de energía E, y al cabo de un tiempo t de funcionamiento, vale

$$I = \frac{E}{4\pi r^2 v_1} + \frac{4E(1-a)}{v_1 a S}\left[1 - e^{\frac{-S \log_e (1-a)}{4V} t}\right] \quad ,, \quad (114)$$

expresión en la cual, como siempre, v_1 es la velocidad de propagación y V el volumen del recinto y a el coeficiente de absorción.

En todos los casos prácticos, el valor de la exponencial decrece rápidamente, o sea, que se alcanza casi instantáneamente el régimen permanente, pudiendo, por tanto, ponerse

$$I = \frac{E}{4\pi r^2 v_1} + \frac{4E(1-a)}{v_1 a S} \quad ,, \quad (115)$$

Si suponemos colocado en el punto considerado — que es el centro de una esfera — (un microfóno direccional), se podrá expresar la energía eléctrica que transforma como sigue:

$$W = I \cdot F(\varphi,)\psi,$$

en la que I es la densidad media de energía acústica, y $F(\varphi, \psi)$ una función de los ángulos acimutal y cenital, que determinan la orientación del micrófono y que caracterizan la sensibilidad del mismo.

La densidad media de energía que llega al micrófono procedente de un elemento de superficie dS, será

$$di = I \cdot \frac{dS}{4\pi r^2}$$

y la energía eléctrica que significa:

$$dW = \frac{I}{4\pi r^2} dS\, F(\varphi, \psi)\, d\varphi,\, d\psi.$$

El total de energía es

$$W = \int dW = I \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} F(\varphi, \psi)\, d\varphi\, d\psi$$

y como la densidad media de energía correspondiente a las reflexiones viene representada por el segundo miembro de (115),

$$W = \frac{4E(1-a)}{v_1 a S} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} F(\varphi, \psi)\, d\varphi\, d\psi$$

La energía debida al rayo directo es

$$W' = \frac{E}{4\pi r^2 v_1} F(\varphi, \psi);$$

por tanto, la reverberación verdadera será

$$\eta_v = \frac{W}{W'} = \frac{16\pi v_1^2 (1-a)}{a S} \cdot \frac{\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} F(\varphi, \psi)\, d\varphi\, d\psi}{F(\varphi_D, \psi_D)}$$

el primer factor es la reverberación aparente, luego:

$$\eta_v = \eta_a \cdot \frac{\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} F(\varphi, \psi)\, d\varphi\, d\psi}{F(\varphi_D, \psi_D)} \qquad (116)$$

φ_D y ψ_D son los ángulos acimutal y cenital que determinan la posición del foco respecto del micrófono.

Para diversas clases de música o para conseguir en los programas de radioteatro efectos especiales se utilizan salas cuyo tiempo de re-

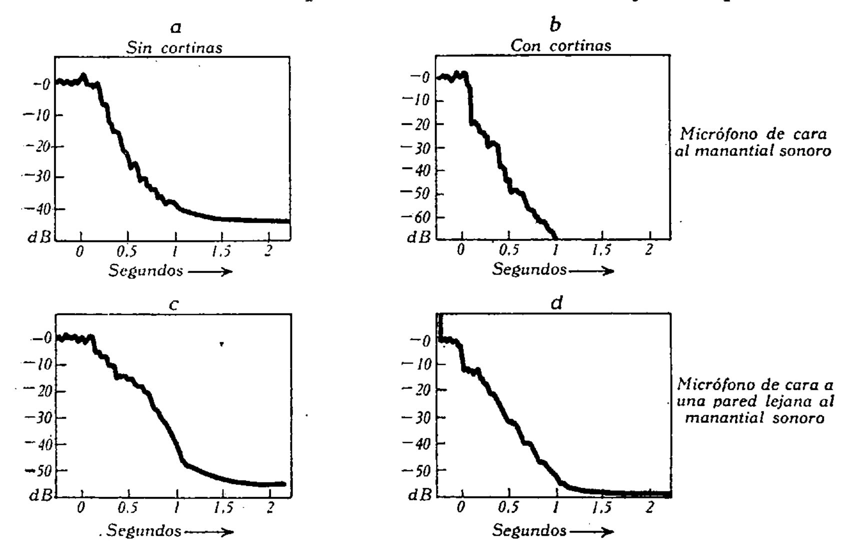


FIG. 163. Curvas de decrecimiento sonoro

verberación se pueda variar a voluntad plegando o descorriendo cortinajes, tapando o no superficies metálicas muy reflectantes que se pueden orientar convenientemente. En la figura 163 se ven las curvas de decrecimiento acústico en un estudio que se varían a discreción colocando cortinas o cambiando la orientación del micrófono.

Es fundamental en todos los estudios que el nivel de ruidos sea muy bajo. Esto se consigue cuidando del aislamiento acústico, y estas cuestiones se resuelven aplicando los conocimientos teóricos expuestos al hablar de la absorción y de la transmisión acústica entre locales. Vamos ahora a mencionar únicamente algunos datos técnicos; las construcciones se realizan generalmente con «insulita» (cemento a base de pasta de madera). Como los estudios son recintos totalmente aislados en los cuales no pueden disponerse ventanas para ventilación ni iluminación, por el gran coeficiente de transmisión que tendría una lámina única de cristal, es preciso proceder a instalar en los mismos sistemas de renovación de aire, de calefacción y de refrigeración, siendo el alumbrado casi siempre eléctrico.

Estas instalaciones, sobre todo la de ventilación, debe estar muy cuidada, ya que pone en comunicación el estudio con el exterior, que es la fuente de ruidos. Por ello han de colocarse las máquinas aspiradoras e inyectoras lo más lejos posible y sobre filtros mecánicos para que no transmitan sus vibraciones. Las tuberías conviene disponerlas según indicamos al hablar de los filtros acústicos, y huir del empleo de materiales metálicos, procurando al mismo tiempo que sean ignífugos.

Cuando se proyecta un estudio para Radiodifusión, debe tenerse en cuenta, además de las características técnicas mencionadas, un gran número de requerimientos prácticos, entre los cuales requiere cuidado especial la independencia de tránsito de uno a otro, la decoración agradable, pero de acuerdo con las condiciones acústicas deseadas, el que cada estudio tenga un puesto de observación aislado para el operador de control, que haya interconexión microfónica entre los estudios y que exista una completa red de indicadores de mando y aviso con objeto de que los programas se empiecen y terminen a las horas prefijadas y se conjunten entre sí, aunque diversos grupos que hayan de actuar en un mismo programa se encuentren en salas distintas.

Entrar en el detalle de todas estas particularidades sería dar un curso de Radiodifusión, que no es el objeto de esta obra, y así a título informativo vamos a indicar en el esquema de la figura 164 la red de órganos de mando y conexión, así como amplificadores de una instalación para la Western Electric desarrollada por los Bell Telephone Laboratories.

Existe un equipo mezclador de seis canales microfónicos que vienen de diversos estudios. Los preamplificadores *Pa* 1, 2, 3... suelen estar colocados en la cabina de control que sirve a cada estudio. En el puesto de control principal se sitúan los controles de volumen individuales 1, 2... que permiten dosificar, según se desee, la mezcla que tiene por componentes cada uno de los canales.

La línea 7 va a los juegos de fonocaptores o reproductores gramofónicos, y la 8, a los programas que puedan introducirse procedentes de otros puntos y que llegan al estudio por línea telefónica exterior — caso de retransmisiones teatrales, actos públicos o deportivos, etc.—

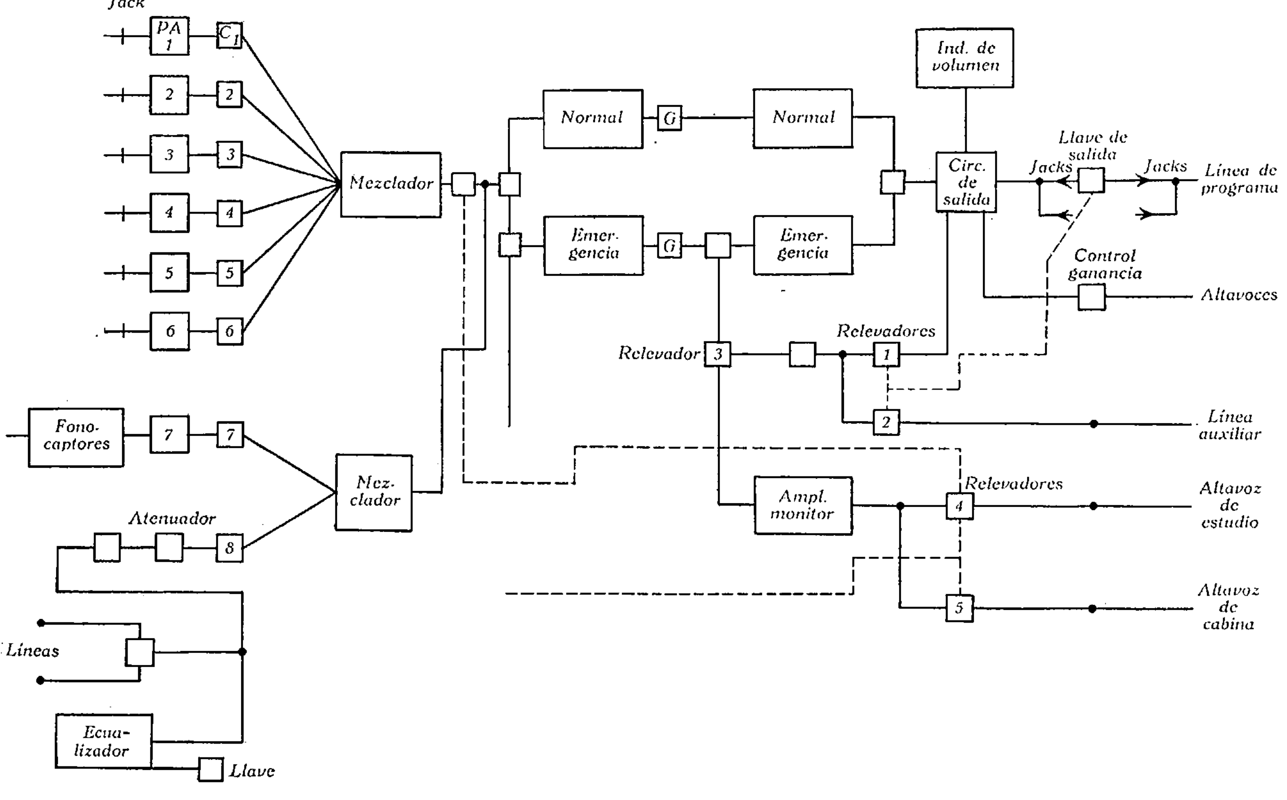


FIG. 164. Esquema teórico de la red de órganos de mando y conexión de una instalación Western Electric

Se dispondrá un sistema de igualación o ecualizador y un sistema de atenuadores para conseguir el nivel deseado.

La mezcla total puede hacerse antes de los dos canales de amplificadores, formado cada uno por un amplificador de refuerzo y otro

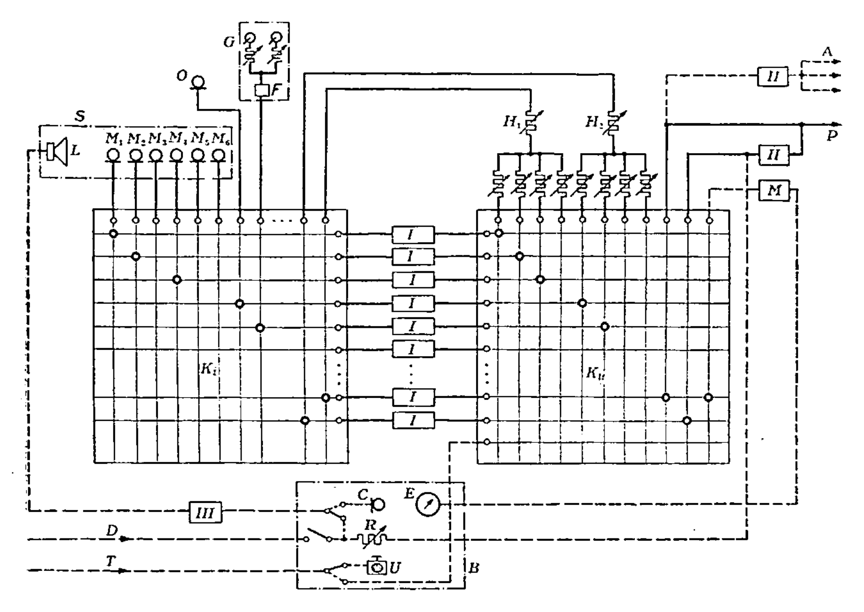


FIG. 165. Vista general de la instalación electroacústica de un estudio

K_i tablero de conexión de entrada,
K_u tablero de conexión de salida,
S estudio con seis micrófonos M_1 a M_6 y altavoz de escucha o para órdenes,
O micrófono en la cabina del locutor,
G tocadiscos con filtro de corrección F,
H_1 y H_2 reguladores principales,
P línea de programa,
A línea testigo,
I amplificador universal,
II amplificador separador,
III amplificador de potencia,
M aparato de medida indicador de porcentaje de modulación,
B local de control,
C micrófono de instrucciones,
R regulador,
U aparato telefónico que puede servir para conectar a línea recibiendo programas

de programa. A la salida, la energía disponible se divide en tres partes, que son: la línea de programa que va ya directamente al amplificador y modulador de la emisora, al indicador de volumen y a un monitor que lleva señales a los estudios que no están en trabajo y al altavoz de la cabina de control.

Se disponen las llaves conmutadoras de forma que no existan ruidos de conexión.

También existen redes de señales luminosas que, según un código convenido, indican «atención», «prevención», «comenzad», «radiando programa», etc.

Técnica microfónica en los estudios de Radiodifusión. El empleo de los micrófonos en los estudios debe enfocarse desde el punto de vista de que los sonidos que captan se producen únicamente para ese fin, y como los oyentes no observan la escena al mismo tiempo, se dispone de una gran libertad de acción y maniobra que permite colocar los focos sonoros, micrófonos, etc., en posición adecuada, así como variar las condiciones acústicas del estudio hasta conseguir las circunstancias y «clima» más favorable. Debe tenerse en cuenta, no obstante, una serie de normas técnicas que iremos mencionando sucesivamente. La distancia a que puede colocarse el micrófono del manantial sonoro depende fundamentalmente de la relación señal/ruido que nos fijemos. Los micrófonos tienen un cierto nivel de ruido característico, y si los alejamos demasiado del foco sonoro, la relación señal/ruido mencionada irá disminuyendo.

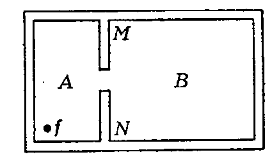


FIG. 166

Si se trata de programas en los que los ejecutantes sean en número escaso y su posición inmóvil, no existe problema alguno, ya que en cada caso puede elegirse y orientarse el micrófono adecuado — según diremos más adelante —; pero si radiamos programas especiales en los que los ejecutantes son muchos o cambian su posición sin que el micrófono les acompañe en sus movimientos, deben tenerse muy presentes sus características de directividad.

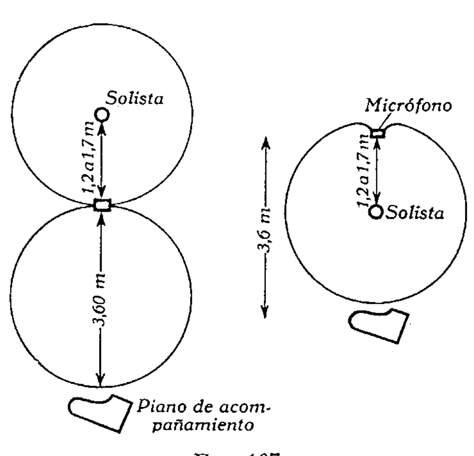


FIG. 167

Los micrófonos de presión tienen características de fidelidad dependientes de su orientación respecto al rayo acústico; por tanto, quedará fijado el menor ángulo según el cual pueden llegar los sonidos de acuerdo con la distorsión tolerable que nos impongamos, y esto obligará a no dispersar excesivamente los componentes de una orquesta. Si consideramos los micrófonos de velocidad — muy directivos —, pero de directividad independiente de la frecuencia, debe observarse la misma precaución, aunque no por el motivo de la distorsión, sino por no hacer pequeña la relación señal/ruido o insuficiente la señal

necesaria para ataque al amplificador sin necesidad de tener que forzar la ganancia de éste.

A veces, esto que parece un inconveniente o defecto, se estima es una gran ventaja, pues orientando convenientemente el micrófono, se favorece la captación de los sonidos producidos por determinados

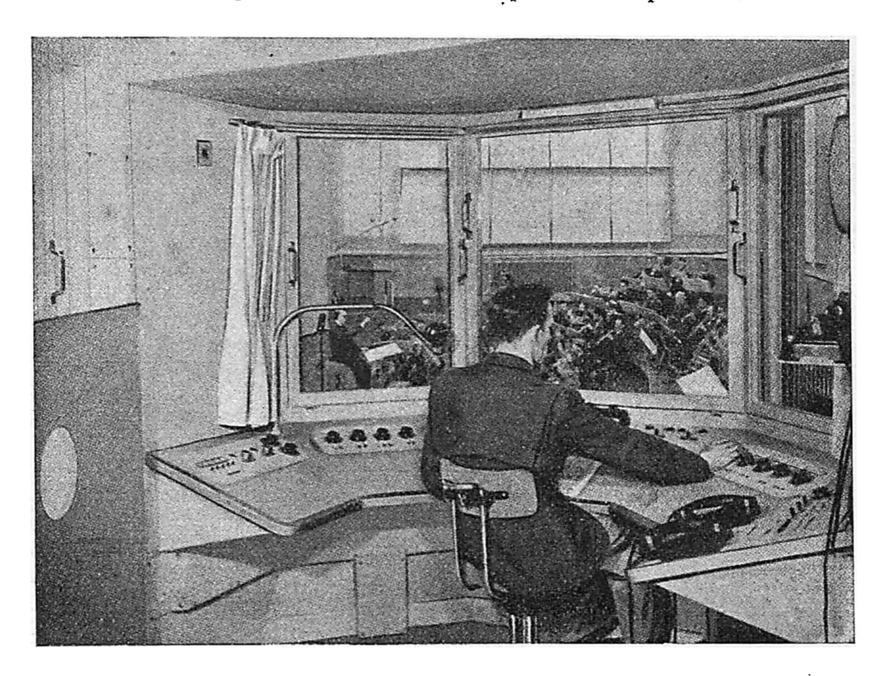


FIG. 168. Puesto de control y mando del estudio anterior. Se observan los pupitres de señales, reguladores de volumen, mandos de mezcladores, etc. Desde este puesto se domina toda la sala, estando separada de ella por dobles tableros de cristal con cámara de aire de 8 cm.

instrumentos o un cantante en un conjunto. También se pueden obtener efectos de alejamiento con gran sencillez.

Aunque antiguamente era corriente el empleo simultáneo de varios micrófonos por ser los utilizados poco sensibles y con un alto nivel de ruidos, para sumar sus salidas, también ahora se sigue esta técnica algunas veces; pero hay que saber que la utilización de dos micrófonos a la vez produce inevitablemente distorsión lineal de amplitud, y en este caso deben colocarse de modo que las zonas que sirven estén lo más independientes posible y sus salidas se mezclen por igual.

En los estudios de Radiodifusión debe existir un gran número de micrófonos de todas clases, ya que usándose para fines muy diversos, se requerirán de propiedades diferentes; los más usados son los de velocidad (bidireccionales) y los unidireccionales por combinación con otros tipos.

Los programas de una emisora de Radiodifusión suelen clasificarse en varios grupos, a los que iremos pasando revista sucesivamente:

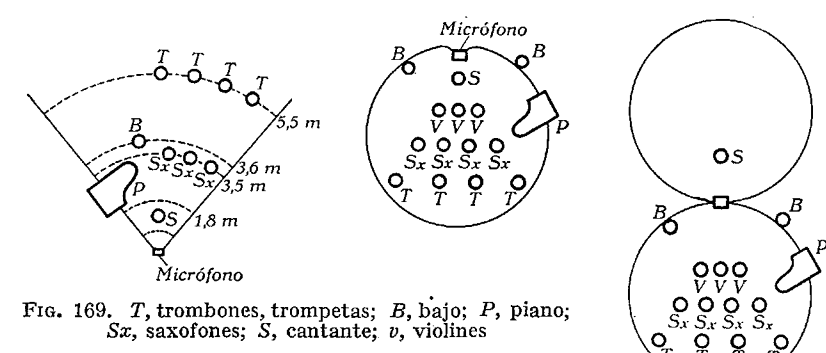


FIG. 169. *T*, trombones, trompetas; *B*, bajo; *P*, piano; *Sx*, saxofones; *S*, cantante; *v*, violines

FIG. 170

1.° *Conferencias y locutores.* En este caso no existe problema de directividad, ya que el orador no cambia de posición y está colocado cerca del micrófono. El requisito que debe cumplirse es que el sonido directo predomine sobre el reflejado, para que la articulación sea buena. No suelen emplearse micrófonos de velocidad porque refuerzan las notas graves al estar el foco sonoro próximo y se disminuiría la inteligibilidad. Úsanse los micrófonos de bobina móvil o el unidireccional haciendo la conmutación oportuna para que sólo funcione la sección omnidireccional.

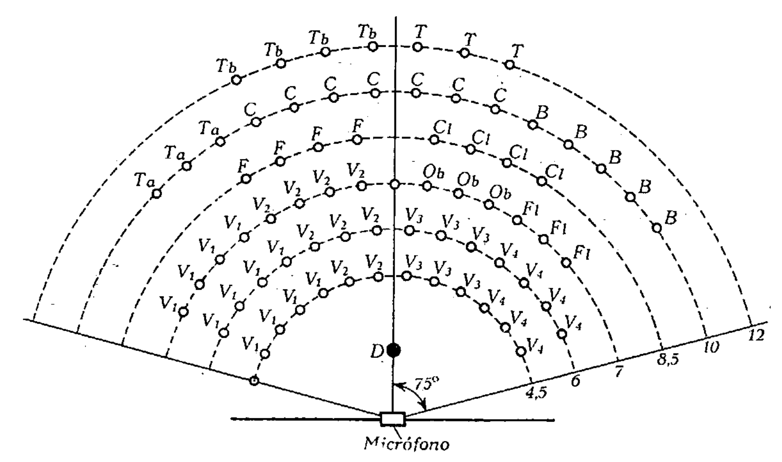


FIG. 171. V_1, violines primeros; V_2, violines segundos; V_3, violas; V_4, violonchellos; *Ob*, oboes; *Fl*, flautas; *F*, fagot; *Cl*, clarinetes; *Ta*, tuba; *C*, corno; *B*, contrabajo; *Tb*, trombón; *T*, trompeta

2.° *Cantantes o solistas con acompañamiento de piano o guitarra.* Se necesita establecer un porcentaje adecuado entre el solista y el

acompañamiento, empleándose micrófonos bidireccionales o unidireccionales. En la figura 167 se ve la disposición de ejecutantes y micrófono con las zonas que caen dentro de las características de directividad.

3.° *Orquestas de música ligera.* Como estas orquestas están formadas por un pequeño número de ejecutantes y suelen ocupar estudios de tiempo de reverberación algo elevados (vivos), se emplean

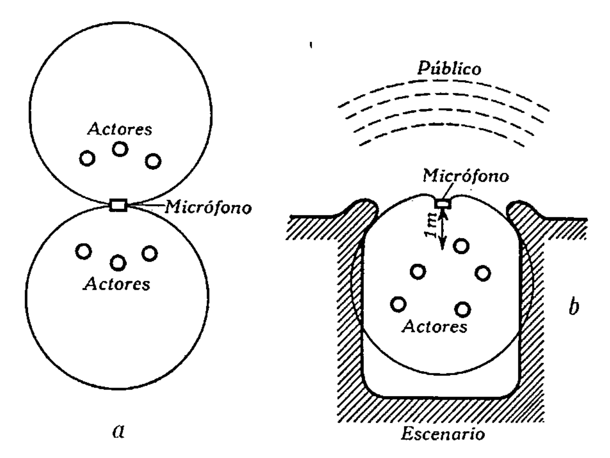


FIG. 172

micrófonos semidireccionales; con su uso se suele dar la impresión de que la orquesta es más numerosa y la música más pastosa y de mayor calidad, puesto que, por ser dichos micrófonos poco directivos, para las bajas frecuencias los graves son reforzados con los rayos indirectos.

En la figura 169 se observa la disposición de los elementos si la orquesta es poco numerosa. Si el conjunto fuese más nutrido, pueden utilizarse micrófonos bidireccionales y unidireccionales, según se indica en la figura 170.

4.° *Orquesta sinfónica.* Los micrófonos utilizados son los unidireccionales, porque permiten distribuir los ejecutantes sobre un área determinada y de modo análogo a como normalmente se hace el desarrollo de una orquesta de este tipo.

Los aparatos utilizados deben ser de la mejor calidad y con características de respuesta perfectamente plana. En la figura 171 se ve la disposición.

5.° *Teatro radiofónico.* Se emplea el micrófono bidireccional; de esta forma se producen o logran efectos de alejamientos, entradas, lejanías, etc. (fig. 172, *a*).

Es interesante también fijarse en que los actores en los diálogos pueden enfrentarse, con lo cual su trabajo se realiza con mayor naturalidad.

Si se realizan retransmisiones desde teatros o salas en las que hay público, deben usarse micrófonos unidireccionales enfocados según indica la figura *b* de la 172, con lo cual no se captan los ruidos de la sala.

Atenuadores. Conviene a veces utilizar en los estudios o salas de audición dispositivos que produzcan pérdidas determinadas y a la vez adapten las impedancias entre generador y receptor; a estas redes se les llama «atenuadores». Están formadas por células en *L*, *T* o π, que deben ofrecer una impedancia de entrada igual a la del receptor. Casi siempre estas redes están formadas por resistencias óhmicas que se calculan por las fórmulas que a continuación se indican: Célula en *L* (fig. 173):

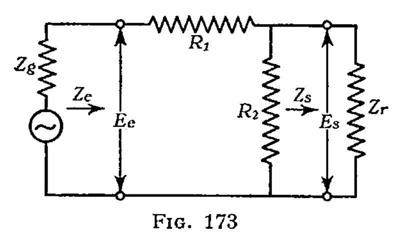


FIG. 173

$$R_1 = Z_g - \frac{R_2 Z_r}{R_2 + Z_r} \quad ,, \quad R_2 = Z_r \sqrt{\frac{Z_g}{Z_g - Z_r}}$$

y suele hacerse

$$Z_e = Z_g \quad ,, \quad Z_r = Z_s$$

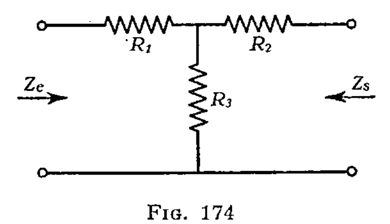


FIG. 174

El atenuador en T (fig. 174) se calcula por las fórmulas:

$$R_1 = \frac{1 + G^2}{1 - G^2} - 2\sqrt{Z_e Z_s} \frac{G}{1 - G^2}$$

$$R_2 = Z_s \frac{1 + G^2}{1 - G^2} - 2\sqrt{Z_e Z_s} \frac{G}{1 - G^2}$$

$$R_3 = 2\sqrt{Z_e Z_s} \frac{G}{1 - G^2}$$

$$\text{Si } Z_e = Z_s \;,, \; R_1 = R_2 = Z_e \cdot \frac{1 - G}{1 + G}$$

$$R_3 = 2 Z_e \frac{G}{1 - G^2} \;,, \text{ y } G = \frac{E_s}{E_e}$$

Muy usada es la célula en π (fig. 175), cuyas fórmulas son:

$$R_1 = \sqrt{\frac{Z_e Z_s}{2}} \cdot \frac{1 - G^2}{G}$$

$$R_2 = Z_e \left[\frac{1 - G^2}{1 - 2\sqrt{\frac{Z_e}{Z_s}}\, G + G^2} \right]$$

$$R_3 = Z_s \left[\frac{1 - G^2}{1 - \frac{G}{2\sqrt{\frac{Z_e}{Z_s}}} + G^2} \right]$$

Como todas estas redes producen pérdidas, la relación $\frac{P_e}{P_s}$ es menor que la unidad, y G medirá la atenuación, pudiéndose expresar en la forma

$$N_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \cdot \frac{P_e}{P_s}$$

que se producen N decibelios de atenuación.

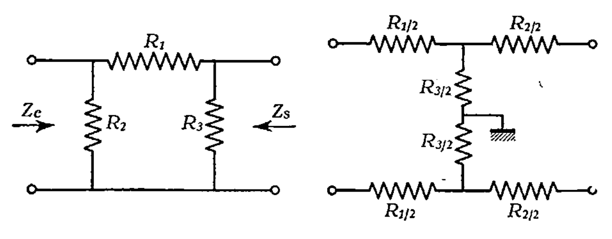


FIG. 175

Pérdida de inserción. Observando las ecuaciones que dan los valores de los brazos de las células en T y π se observa que únicamente habrá soluciones positivas, o sea, valores reales de resistencia cuando se verifique simultáneamente:

$$Z_e \frac{1 + G^2}{1 - G^2} > 2\sqrt{Z_e Z_s} \cdot \frac{G}{1 - G^2} \text{ ,, o sea } \frac{1 + G^2}{2\,G} > \sqrt{\frac{Z_e}{Z_s}}.$$

$$Z_s \frac{1 + G^2}{1 - G^2} > 2\sqrt{Z_e Z_s}\, \frac{G}{1 - G^2} \text{ ,, o sea } \frac{1 + G^2}{2\,G} > \sqrt{\frac{Z_s}{Z_e}}.$$

según que $Z_e > Z_s$ ó $Z_e < Z_s$;

y de aquí podemos deducir:

Si al calcular un atenuador imponemos la condición de que tenga una atenuación determinada, queda fijado un límite máximo para el valor de la relación de transformación de la célula; si, por el contrario, fijamos la relación de transformación, implícitamente quedará fijado un valor mínimo de atenuación del cual no se puede bajar.

Los dos problemas anteriores se calcularán por las condiciones dichas antes, y así, por ejemplo, la atenuación mínima para un valor Z_e/Z_s determinado será:

$$N^2_{\text{mín}} - 2\,N_{\text{mín}}\sqrt{\frac{Z_e}{Z_s}} + 1 = 0$$

$$N_{\text{mín}} = \sqrt{\frac{Z_e}{Z_s}} + \sqrt{\frac{Z_e - Z_s}{Z_s}}$$

Cálculo de atenuadores. Los atenuadores normalmente no son fijos, sino que se disponen de forma que puedan dar a voluntad atenuaciones variables, aunque conserven siempre la adaptación de im-

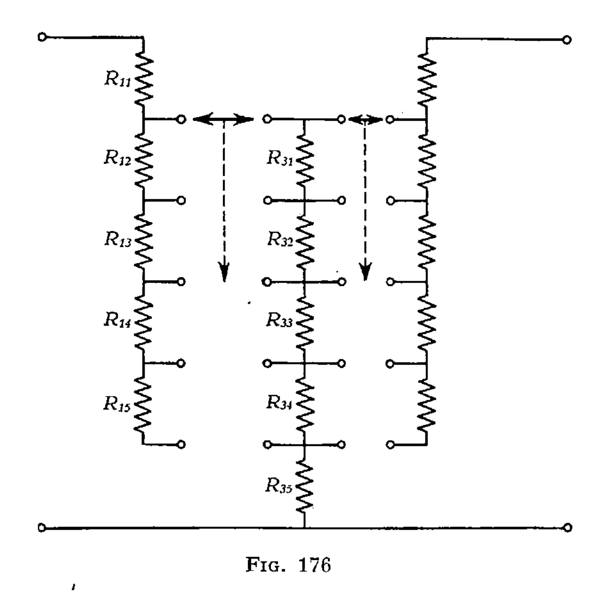


Fig. 176

pedancias de entrada y salida. El caso de estos atenuadores se reduce al cálculo de los fijos, y este problema se resuelve utilizando las fórmulas ya mencionadas. Como en dichas fórmulas intervienen funciones de G (que suele ser uno de los datos), se acostumbra tabular esos términos para después utilizarlos.

Copiamos la tabla que va en la página siguiente, muy útil en los proyectos numéricos.

CUADRO 17

Atenuación dB	$G = \frac{I}{A}$	$I - G$	G^2	$\frac{G}{I - G}$	$\frac{I + G}{I - G}$	$\frac{I - G^2}{G}$	$\frac{G}{I - G^2}$	$\frac{I + G^2}{I - G^2}$
1	0,8912	0,1088	0,7943	8,195	17,391	0,2308	4,333	8,724
2	0,7943	0,2057	0,6310	3,862	8,724	0,4646	2,152	4,419
3	0,7079	0,2921	0,5012	2,424	5,848	0,7046	1,4192	3,009
4	0,6310	0,3690	0,3981	1,710	4,419	0,9539	1,0483	2,323
5	0,5923	0,4077	0,3162	1,285	3,570	1,2156	0,8224	1,925
6	0,5012	0,4988	0,2512	1,0048	3,009	1,4941	0,6693	1,671
7	0,4467	0,5533	0,1995	0,8073	2,615	1,7920	0,5580	1,4985
8	0,3981	0,6019	0,1585	0,6614	2,323	2,114	0,4730	1,3767
9	0,3548	0,6452	0,1259	0,5499	2,100	2,464	0,4059	1,2880
10	0,3162	0,6838	0,1000	0,4625	1,925	2,856	0,3514	1,2222
11	0,2818	0,7182	0,0794	0,3924	1,785	3,266	0,3062	1,1726
12	0,2512	0,7488	0,0631	0,3354	1,671	3,730	0,2687	1,1347
13	0,2239	0,7761	0,0501	0,2884	1,577	4,243	0,2357	1,1055
14	0,1995	0,8005	0,0398	0,2493	1,4985	4,812	0,2078	1,0829
15	0,1778	0,8222	0,0316	0,2163	1,4326	5,446	0,1836	1,0653
16	0,1585	0,8415	0,0251	0,1883	1,3767	6,151	0,1626	1,0515
17	0,1412	0,8588	0,0199	0,1645	1,3290	6,938	0,14413	1,0407
18	0,1259	0,8741	0,0158	0,1440	1,2880	7,817	0,12792	1,0322
19	0,1122	0,8878	0,0126	0,12638	1,2528	8,800	0,11363	1,0255
20	0,1000	0,9000	0,0100	0,11111	1,2222	9,900	0,10101	1,0202
25	0,0562	0,9438	0,0032	0,05958	1,1192	17,727	0,05641	1,0063
30	0,0316	0,9684	0,0010	0,03265	1,0653	29,82	0,03165	1,0020
35	0,0178	0,9822	0,00032	0,01810	1,0362	56,21	0,01779	1,00063
40	0,0100	0,9900	0,00010	0,01010	1,0202	99,99	0,01000	1,00020
45	0,0056	0,9944	0,000032	0,00565	1,0113	177,83	0,00562	1,00006
50	0,0032	0,9968	10^{-5}	0,00317	1,0063	316,2	0,00316	1,00002
60	0,001	0,9990	$3,16 \cdot 10^{-6}$	0,00100	1,0020	1000,0	0,00100	1
70	0,00032	0,9997	10^{-6}	0,00032	1,0006	3162	0,000316	1
80	0,0001	0,9999	$3,16 \cdot 10^{-7}$	0,00010	1,0002	10000	0,00010	1
90	0,000032	1	10^{-7}	0,000032	1	31620	0,000031	1
100	0,00001	1	$3,16 \cdot 10^{-8}$	0,00001	1	10^{-5}	0,00001	1

Ejemplo: Calcúlese un atenuador en T (fijo) que produzca una atenuación de 30 dB y que acople a un amplificador de impedancia de entrada 1000 ohmios una línea de 600 ohmios. Como estas redes son reversibles, puede calcularse al revés y luego cambiar la entrada y salida.

$$\sqrt{\frac{Z_e}{Z_s}} = \sqrt{\frac{1000}{600}} = 1{,}293$$

Para

$$N = 30 \text{ dB} \text{ ,, } G = 0{,}03162,$$

y utilizando la tabla:

$$R_1 = 1000 \times 1{,}002 - 2\sqrt{600 - 1000} \times 0{,}03165 = 973\,\Omega$$

$$R_2 = 600 \times 1{,}002 - 2\sqrt{600 \cdot 1000} \times 0{,}03165 = 572{,}2\,\Omega$$

$$R_3 = 2\sqrt{600 \cdot 1000} \times 0{,}03165 = 29\,\Omega.$$

Si quiere calcularse un atenuador variable, y al decir variable quiere entenderse que la variación no es continua, sino por pasos lo

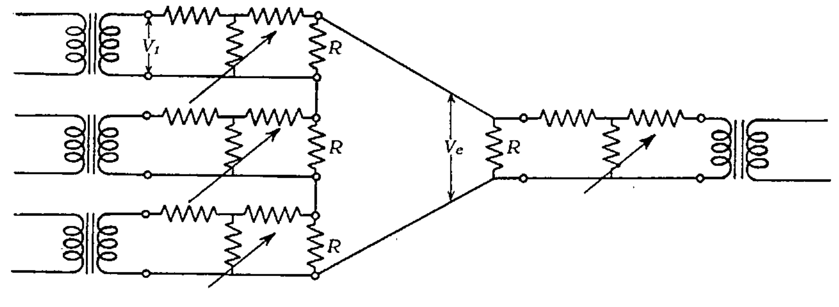


Fig. 177

más suaves posible, el problema se reduce a repetir la operación varias veces, con lo cual se calculan varios juegos de resistencias, que se disponen en fracciones aditivas o substractivas, de modo que una corredera o mando giratorio vaya haciendo las conmutaciones. En la figura 176 se observa un atenuador en T variables que permite 5 puntos de atenuación gradual distinta.

Mezcladores. Si tenemos varios canales por los que avanzan señales distintas que queremos mezclar dosificándolas convenientemente, en un único canal, es preciso utilizar un mezclador. Está compuesto por un conjunto de atenuadores fijos o variables conectados a cada línea y cuyas salidas se unen en otra línea única. Fundamentalmente existen tres tipos de mezcladores, según la forma en que se unen los atenuadores que lo constituyen: Serie, paralelo y serie-paralelo.

En todos los casos es preciso tener en cuenta que la impedancia de salida de cada atenuador sea independiente de su ajuste para que no exista reacción recíproca entre ellos.

En la figura 177 se observa la disposición de un mezclador-serie

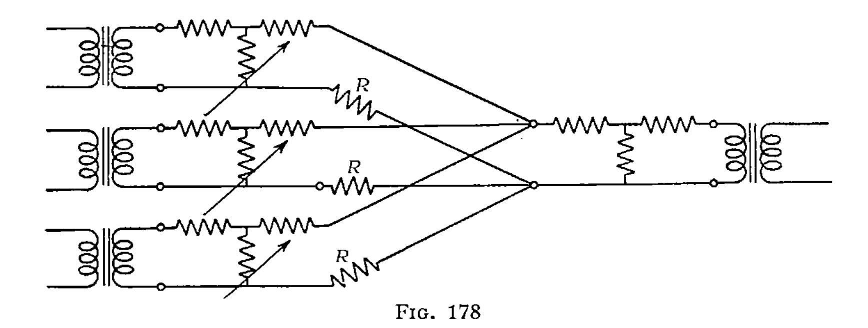


Fig. 178

para tres canales. Con objeto de que no haya reacción entre ellos, a cada célula individual se le cierra por una resistencia de carga que cumple la condición

$$R = \frac{n+1}{n-1} Z_o.$$

siendo Z_o la impedancia característica del atenuador y n el número de canales.

La mezcla se verifica a la entrada del atenuador general final.

La atenuación total que produce este mezclador es

$$A_T = A + \log_e n + A_F,$$

siendo A y A_F las atenuaciones de los de entrada y salida.

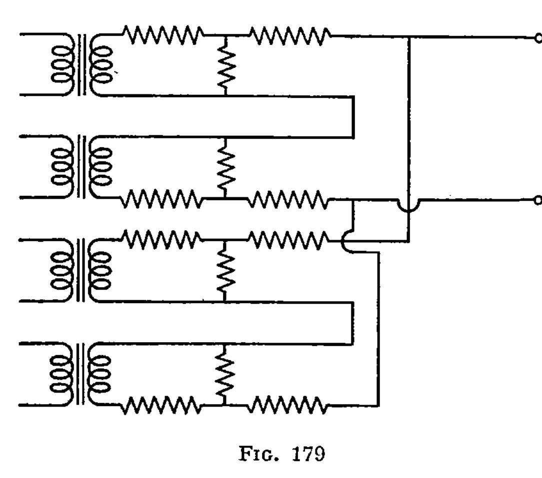


Fig. 179

En la figura 178 se observa un atenuador en paralelo para tres canales; la misma fórmula sirve para este caso, estando R determinado por

$$R = \frac{n+1}{n-1} Z_o$$

Finalmente, puede hacerse un acoplamiento en serie-paralelo según el esquema de la figura 179.

CAPÍTULO IV

Estudios cinematográficos y salas de captación para televisión

Aunque no siempre se televisan escenas en estudios, pues muchos programas se realizan al aire libre y sin preparación ni entrenamiento de los actores, tales como actos públicos, reuniones deportivas, etc., vamos a incluir conjuntamente la exposición de las particularidades de las dos clases de estudios mencionados, porque se parecen mucho, aunque sean distintos en las instalaciones y en el tamaño.

Los estudios cinematográficos suelen tener grandes dimensiones, con objeto de que puedan disponerse en su interior grandes decorados; su forma es rectangular, y sus dimensiones aproximadas de 40 ó 50 × × 30 ó 40 × 15 ó 18 m.

Deben estar totalmente aislados acústicamente del exterior, estimándose un nivel de ruidos aceptable cuando es de 5 dB sobre el nivel normal de audibilidad. Las paredes y el techo se suelen cubrir de lana mineral o fibra de vidrio en un espesor de 10 cm, estando esta capa sujeta por tiras de muselina y clavos de madera.

Las paredes se hacen dobles, de cemento especial y sobre fundaciones antivibratorias. Cuando se disponen varios estudios, se enlazan entre sí por dobles puertas dejando entre ellos pasadizos.

En la figura 180 se ve el corte de un estudio, indicándose los materiales de que está construído y su colocación.

Todas las normas sobre la relación entre dimensiones y número de ejecutantes que mencionamos al hablar de los estudios de Radiodifusión, no se cumplen ahora, pues aquí la mayor parte del volumen del estudio está ocupado por decoraciones, proyectores luminosos, etc. Los tiempos de reverberación no serán los mejores que podrían conseguirse, sino que deben modificarse para que respondan a la escena tomada, dando sensación de realidad.

Como los escenarios no están cerrados, ya que como mínimo siempre faltará el techo, los tiempos de reverberación serán menores que los que existirían en una habitación real. Para compensarlo se recurre al empleo de micrófonos adecuados o se disponen paredes movibles reflectoras que aumentan ese tiempo.

Salas de proyección de cinematógrafo y teatros. En el caso de estas salas, los requerimientos no son tan severos por diversas razones: el manantial sonoro — o sea, los altavoces — colocados en el escenario,

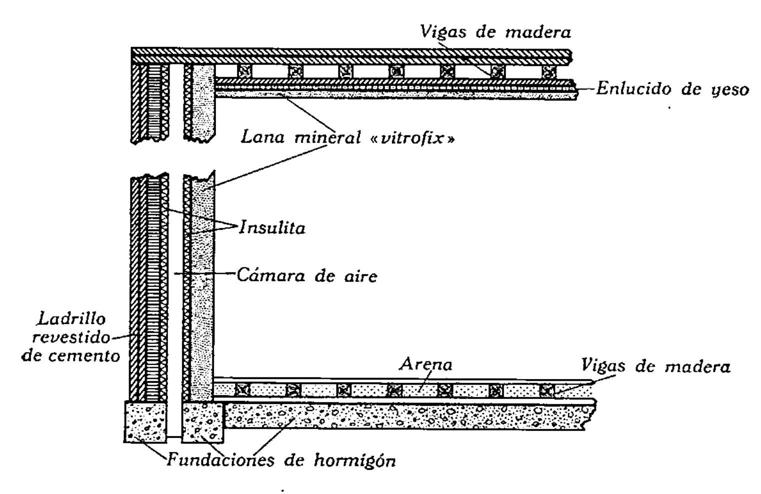


Fig. 180. Corte de un estudio de cinematógrafo

puede elegirse para que entregue la potencia deseada por grande que ésta sea, así que el nivel de ruidos procedente del exterior no tendrá que ser excesivamente bajo, y aunque se puede aislar acústicamente el local, no se hace con la rigurosidad que en las salas tratadas anteriormente.

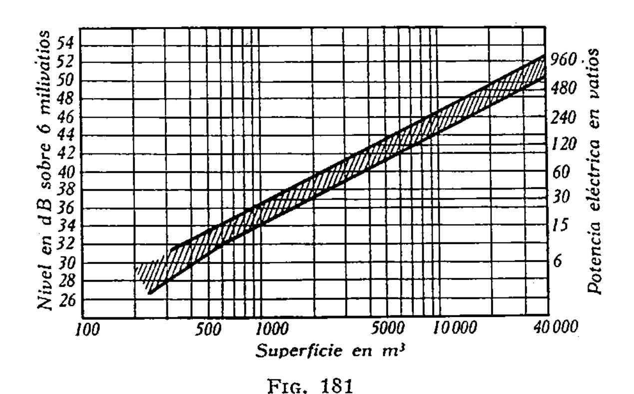


Fig. 181

La relación señal/ruido se impone al proceso amplificador.

Los problemas serán ahora:

Cálculo de la potencia acústica y como consecuencia de la eléctrica necesaria para cubrir la sala.

Cálculo de la reverberación deseada.



FIG. 182. Vista de una sala de proyección cinematográfica. Puede observarse el reparto de materiales absorbentes por la superficie de la sala

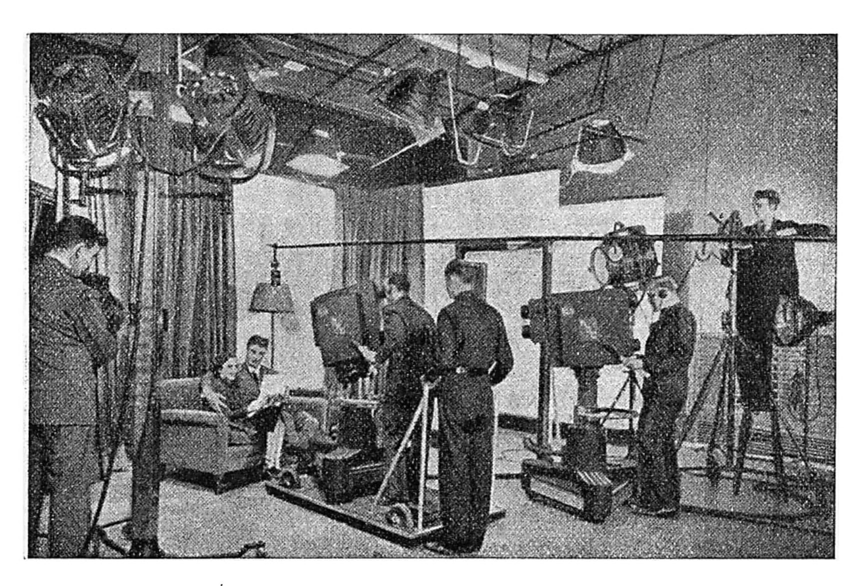


FIG. 183. Disposición de las cámaras, iconoscopios, micrófonos, etc., en un estudio de la NBC donde se televisa una escena

Procurar que no se formen reflexiones excesivas ni ondas estacionarias.

Cálculo de la potencia necesaria en un local.

Se puede calcular la potencia acústica necesaria por una de las dos fórmulas:

$$W_a = 0{,}005\ S \text{ watios,}$$

$$W_a = 0{,}0045\ N \text{ watios}$$

bien sea en función de la superficie del local en metros cuadrados, o bien en función del número de asientos.

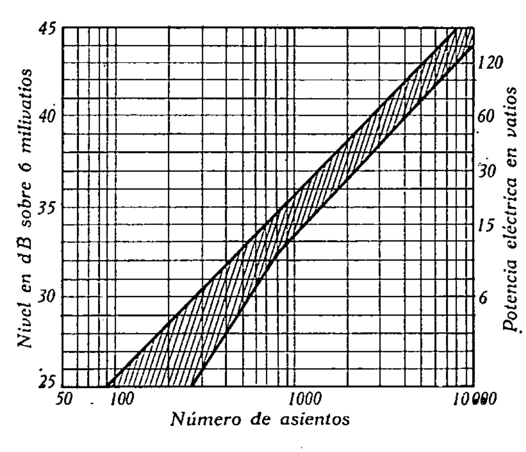


Fig. 184

En la práctica se realizan los dos cálculos tomando el mayor valor, el cual es multiplicado por 2 ó 3.

Se ha estimado un rendimiento de 0,3 a 0,5 para los altavoces.

En los ábacos de las figuras 181 y 184 se obtienen directamente estas potencias en watios, o bien el nivel que significa la potencia necesaria expresada en decibelios sobre el nivel de 6 miliwatios. Lo más interesante cuando se diseña un local destinado a sala de audiciones y donde se piensa instalar un equipo megafónico o cinematográfico, es estudiar la forma en que se propagan las ondas dentro del mismo.

Si se dispone del boceto del local pueden trazarse rayos a partir del punto donde se piensa situar el foco sonoro y ver las reflexiones posibles y las interferencias que se pueden producir.

Un procedimiento muy ingenioso para estudiar esta propagación y descubrir los puntos donde se puedan formar ondas estacionarias, es el siguiente: se rellena la maqueta de la sala con agua u otro líquido, produciéndose a continuación y con un pequeño pistón una perturbación en el punto donde estarán situados los altavoces. Por un procedimiento especial se fotografían las ondas.

Debe cuidarse mucho que no se produzcan reflexiones, para lo cual, las partes metálicas, tales como barandillas, etc., deben cubrirse con materiales absorbentes. Lo mismo debe hacerse con las paredes, para lo cual se recubren con alguna de las substancias de que ya hablamos. Las salas más convenientes son las de techo bajo, pues así se ahorran materiales absorbentes y no existen problemas especiales que plantee el acondicionamiento acústico.

A pesar de esto, en muchos casos no se emplean estos diseños, pues son de pequeña cabida, salvo que se tracen de gran longitud, lo que por otras razones es inadmisible.

En la figura 185 se ve un boceto esquemático de una sala de este tipo.

Normalmente, las salas tienen un patio de butacas y uno o varios anfiteatros. Existen normas generales para la construcción, tales como decir que la altura de los techos en los pisos debe ser la tercera parte de su profundidad con respecto al piso superior y mitad de la profundidad del piso inferior.

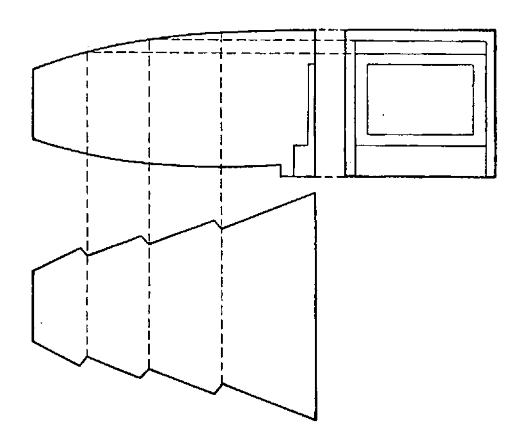


FIG. 185

En la figura 186 damos otro esquema de una sala con su patio de butacas y un anfiteatro.

Como consejos finales en esta cuestión podemos decir que:

a) Debe huirse de las superficies paralelas.

b) Las superficies cóncavas producen «inconvenientes» acústicos.

c) Además de cubrir con materiales absorbentes las superficies reflectoras debe tomarse esta precaución con los pasillos.

d) Los asientos deben forrarse preferentemente con terciopelo o materiales parecidos.

e) El ancho de la sala debe ser un 50 ó 70 % de su longitud, y la altura de techo un 40 ó 50 % de la misma dimensión.

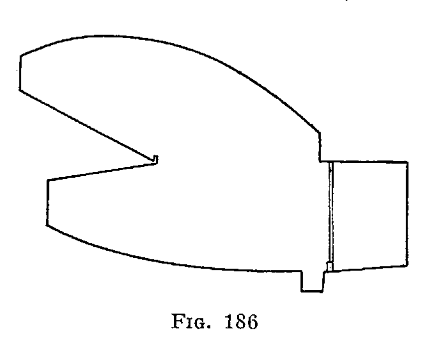


FIG. 186

f) El tiempo de reverberación debe calcularse suponiendo la sala solamente ocupada en la mitad de su cabida, para lo cual se sustituye la absorción que pueden producir los espectadores por la que produzcan los asientos forrados convenientemente.

Instalaciones megafónicas al aire libre. En las audiciones al aire libre se requiere poner en juego potencias mucho mayores que en el caso de locales cerrados, ya que el campo acústico es únicamente debido al rayo directo.

Debe procurarse que el nivel de la señal sea lo más uniforme posible en toda la zona de audición. Esto no siempre es posible, por no

contarse con medios, y entonces hay que pretender que haya un campo de intensidad suficiente en el punto más alejado.

Los problemas que deben resolverse sucesivamente, cuando se quiere realizar una instalación de megafonía, son:

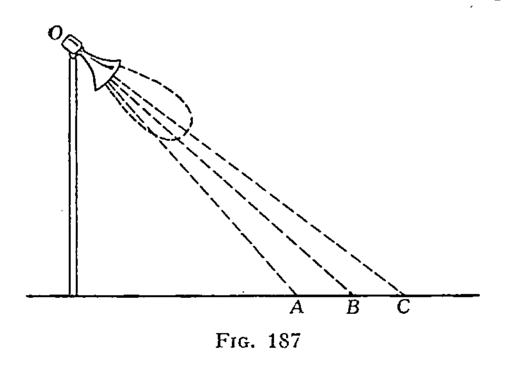


Fig. 187

1.° Determinación de la intensidad necesaria subjetiva para producir una audición cómoda y de acuerdo con la clase de programa (charla, música, etc.).

Se estima que es necesario una señal de 20 ó 30 dB por encima del nivel de ruidos. Se considera también como necesaria una presión acústica de 5 barias para una audición en un espacio con nivel de ruidos normal.

2.° Determinación de la potencia acústica total necesaria.

Muchos constructores dan en las características de sus altavoces el dato de la presión acústica que producen a una determinada distancia, con lo que fácilmente se puede determinar la que producirán a otra distancia, puesto que las presiones acústicas son inversamente proporcionales a las distancias. Esto permite elegir el tipo de altavoz

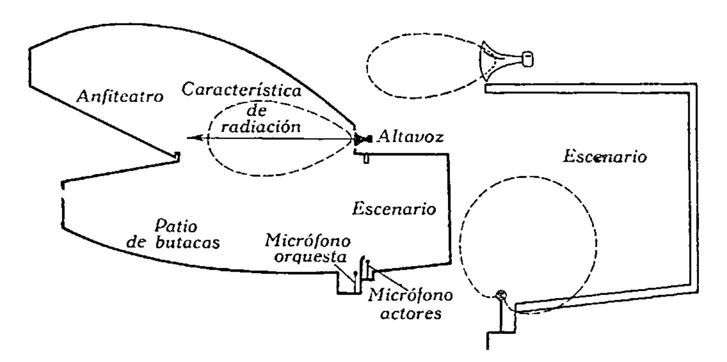


Fig. 188. Instalación megafónica en un teatro: a la derecha se indican las características que deben tener micrófono y altavoz para evitar la realimentación acústica

necesario conocido el número de oyentes probables y la separación entre ellos, o sea, la distancia de alcance por la presión necesaria en el punto más alejado.

3.° Potencia eléctrica del amplificador.

Conocido el rendimiento de los altavoces.

4.° Posición y distribución de los altavoces.

Lo más difícil es resolver la cuarta proposición. Los altavoces suelen montarse sobre columnas de 4 ó 6 m de altura para que la distribución se haga con más rendimiento. Es muy interesante conocer los diagramas de radiación de los altavoces para determinar previamente las zonas servidas, cosa que nos servirá para disponerlos y averiguar el número mínimo de los que se deben emplear.

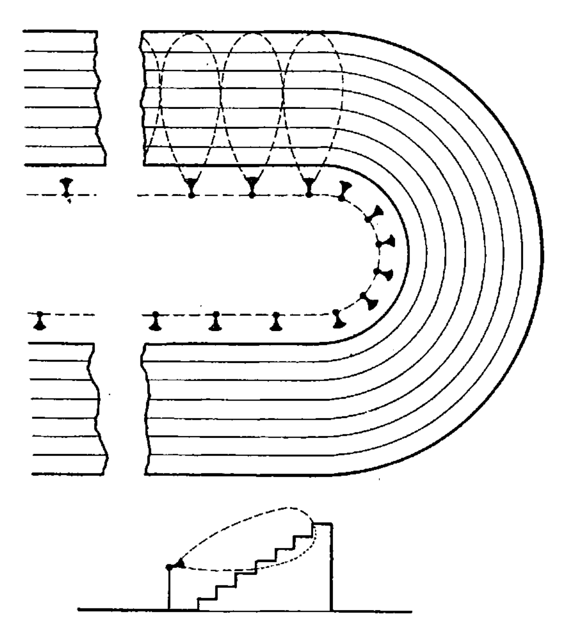


Fig. 189. Instalación megafónica en un gran campo de deportes utilizando una línea de altavoces dirigidos al público

En la figura 187 hemos considerado un altavoz de bocina en el cual el eje del lóbulo de radiación es *OC*.

La zona *AC* está aproximadamente servida con el mismo nivel, ya que la variación de distancia se compensa con la disminución de potencia radiada en las direcciones *OA* y *OB*, etcétera.

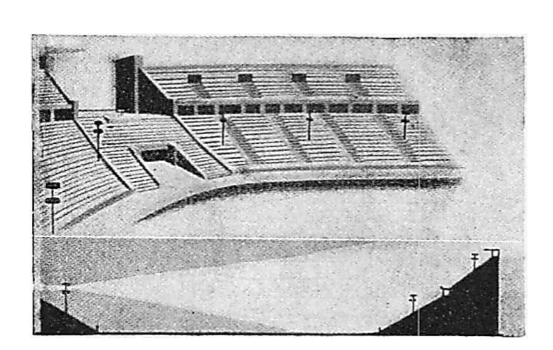
Para aumentar las zonas de audición al mismo tiempo que se hace más uniforme, se utilizan en lugar de altavoces potentes un gran número de ellos repartidos en forma conveniente. Deben inclinarse los ejes de los altavoces de modo que no alcancen el pie de las columnas que soportan los más próximos, y se tendrá especial cuidado en que desde un mismo punto no se oigan dos altavoces que disten de él más de 15 m, pues entonces se percibe un eco (por diferencia de marcha) sumamente molesto. Se notan también ecos e interferencias cuando el sonido se refleja en el suelo, edificios próximos o accidentes del terreno, por lo cual debe tenerse especial cuidado en la orientación de los altavoces.

En las figuras 188 y siguientes se observa la distribución de altavoces en diversas instalaciones, así como esquemas que ilustran sobre montajes típicos. Se indican igualmente las zonas servidas.

Realimentación acústica. Uno de los problemas que plantean las instalaciones megafónicas, lo mismo en locales cerrados que en abiertos (aunque más intensamente en los primeros), es la realimentación.

La potencia acústica puesta en juego no se puede aumentar indefinidamente, pues existirá siempre una frecuencia para la cual, cumpliéndose las condiciones necesarias de fase, llegue al micrófono señal procedente de los altavoces, y el sistema oscilará.

Debe colocarse el micrófono, según esto, en un punto donde no incida o por lo menos sea mínima la señal de los altavoces, y esto se puede conseguir tomando algunas precauciones y conjugando las



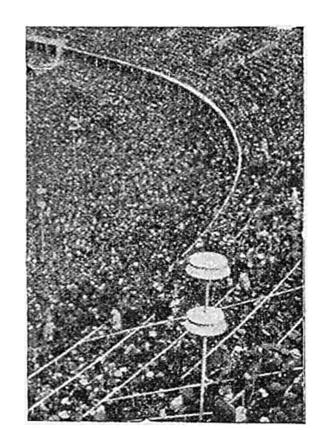


FIG. 190. Instalación de altavoces en el Reichssportfeld

curvas de directividad y la posición de altavoces, micrófono y direcciones de reflexión.

Damos algunos consejos para evitar estas realimentaciones esencialmente molestas.

a) Utilizar micrófonos y altavoces de directividad acusada y conocida.

b) Evitar los picos en las curvas de respuesta de la instalación, ya que un pico a una frecuencia determinada puede producir la oscilación aun para pequeñas amplificaciones.

c) Evitar que se orienten los altavoces hacia superficies reflectoras que puedan enviar el sonido hacia los micrófonos.

d) Cuando no se puedan seguir las recomendaciones anteriores por las peculiaridades del local, se utilizarán micrófonos «duros» (poco sensibles), aun sacrificando la calidad.

En los sitios donde existe un alto nivel de ruidos (campos de batalla, carlinga de aviones, etc.), se utilizan unos traductores sonido-corriente llamados «laringófonos», sumamente «duros», y, por tanto, poco afectados por el nivel de ruidos.

Líneas de conexión. En toda instalación megafónica, o simplemente cuando se enlazan micrófonos u otros traductores con los ampli-

ficadores, se precisan un cierto número de líneas que enlacen entre sí los diversos órganos; las líneas se dividen en dos clases:

a) De bajo nivel, que son las que unen los micrófonos, células, etc., con los amplificadores.

b) Las que unen los amplificadores con los altavoces.

c) Las líneas que llevan la tensión de excitación a los electroimanes de excitación de los altavoces.

Cada tipo de línea debe cumplir un cierto número de requisitos para que no introduzcan ruidos, distorsiones ni atenuaciones elevadas.

En las líneas de bajo nivel debe evitarse cuidadosamente que no capten ruidos parásitos y no proporcionen distorsión de frecuencias. Si se pueden utilizar cables blindados y cortos, la inducción de tensiones parásitas se reduce a un mínimo. Cuando se emplean micrófonos que proporcionan bajos niveles, se acentúa la necesidad de emplear líneas muy cortas, pues si no, las relaciones señal/ruido serían muy reducidas.

Cuando sea imposible debido a las peculiaridades de la instalación el tener cables de longitud inferior a la decena de metros, deben tomarse precauciones muy especiales en el tendido. Se evitará cuidadosamente el que los cables vayan paralelos a líneas de corriente alterna, sobre todo si el camino que siguen juntas puede ser largo.

Se emplean cables construídos especialmente blindados interior y exteriormente y cubiertos de una capa de material especial muy resistente a los agentes atmosféricos.

Si la línea de bajo nivel es a la vez de alta impedancia, se introducen atenuaciones grandes a las altas frecuencias debido a la capacidad distribuída de la línea, y para eliminar este inconveniente no existe más procedimiento que hacer la línea tan corta como se pueda. Como también en las líneas de alta impedancia se favorece la captación de tensiones parásitas, es preferible, siempre que las exigencias no nos lo impongan, utilizar líneas de baja impedancia que sirvan a micrófonos de la misma característica.

En las líneas de alto nivel, la característica más importante es la pérdida de tensión que en ellas se produce por efecto de su resistencia óhmica, pero también tiene interés considerar la distorsión de frecuencia que pueden introducir por el efecto de su capacidad distribuída.

Se suele recomendar trabajar con líneas que ofrezcan una impedancia característica de 500 ohmios, siempre que la tensión no sea superior a 100 ó 130 voltios. Como consecuencia, sólo podrán emplearse estas líneas cuando la potencia de la instalación sea de unos 40 watios. Si la potencia fuese mayor, se utilizan líneas de más baja impedancia.

Las pérdidas por caída óhmica dependen de la sección de los conductores, y deben utilizarse, por tanto, del mayor diámetro posible. Un valor práctico es admitir como máximo una caída en línea del

5 % de la tensión total. En las instalaciones normales no se utilizan cables de sección inferior a un milímetro cuadrado ni superiores a 11,5 mm² y deben estar perfectamente aislados.

Redes de altavoces. Cuando la potencia eléctrica entregada por un amplificador no se disipa totalmente en un solo altavoz, sino que se va a disponer una red de éstos, bien para distribuir mejor la potencia acústica o debido a las exigencias que imponga el tener que llevar

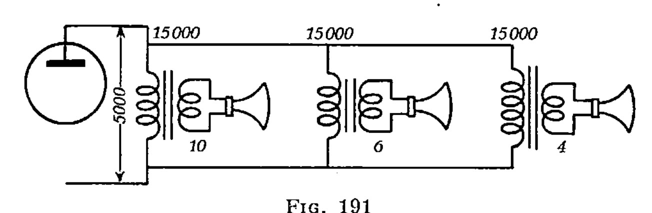


FIG. 191

un programa a varias habitaciones, se precisa estudiar cuidadosamente los problemas de la adaptación de impedancias, así como de las potencias que se llevan a cada uno de los altavoces.

Las consideraciones que regulan el proyecto de una red de este tipo, son fundamentalmente las siguientes:

a) Pueden montarse los altavoces en paralelo, serie o series paralelas.

b) Las impedancias de todos los grupos que se montan en paralelo serán iguales entre sí, salvo, el caso en que se desee una desigual distribución de la energía.

c) Los altavoces de una misma serie serán también de la misma impedancia, con las excepciones señaladas en el párrafo anterior.

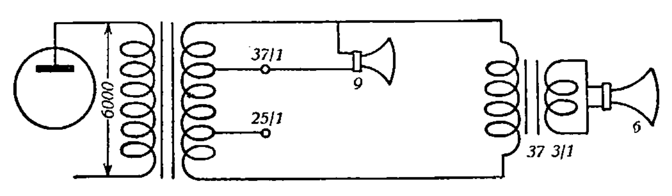


FIG. 192

En las figuras 191 y 192 se ven dos tipos de montaje.

En el primero se tienen tres altavoces distintos cuyas bobinas ofrecen impedancia de 4, 6 y 10 ohmios y que están conectados mediante transformadores de relación de transformación adecuada y montados en paralelo al último paso del amplificador. Como los primarios de esos tres transformadores ofrecen 15 000 ohmios, habremos ajustado la impedancia a la salida del amplificador, que es 5000.

En la segunda se disponen dos altavoces distintos también, cuyas bobinas tienen impedancias de 6 y 9 ohmios y que están unidos a

tomas distintas de un transformador único, cuyo primario se lleva al último paso del amplificador; de esta forma se ofrece una impedancia de 6000 ohmios a dicho amplificador debido a las relaciones particulares de transformación tomadas.

Si todos los altavoces que se agrupan son de la misma potencia nominal de entrada, la impedancia que cada uno de ellos debe ofrecer será la que convenga a la salida el transformador de salida del amplificador, multiplicada por el número de ellos (se montan en paralelo).

CAPÍTULO V

Medidas en micrófonos y altavoces

Generalidades. Es preciso conocer cómo responderán en las utilizaciones los traductores sonido-corriente y corriente-sonido estudiados en capítulos anteriores.

En el caso de los micrófonos conviene trazar dos clases de curvas características, que sirvan para darnos idea de la calidad de los mismos: 1.°, la curva: voltaje a la salida en función de la presión acústica actuante y para una frecuencia fija; 2.°, voltaje de salida en función de la frecuencia de la señal para una presión acústica constante.

Por la primera curva nos daremos idea de la distorsión «no lineal», y por la segunda, de la distorsión lineal de amplitud.

Es interesante tener en cuenta las diferencias que se obtienen en los resultados si la presión acústica estimada es la aplicada directamente a la membrana del micrófono o la que existiría en dicho punto si no hubiésemos colocado dicho aparato.

Ambos conceptos son evidentemente distintos, debido, principalmente, a las pequeñas resonancias que se originan en algunos tipos de micrófonos por la forma peculiar de las cámaras en que se disponen las membranas, y a la difracción del campo acústico causada por la colocación del micrófono en dicho campo.

Como muchos textos indican estos dos tipos de calibrado sin indicar las diferencias, conviene saber que lo verdaderamente interesante es conocer las características en función de la presión «que existía antes de la colocación del micrófono».

Las medidas en altavoces son también imprescindibles y muy numerosas, necesitándose en muchos casos aparatos e instalaciones especiales para realizarlas.

Curva de respuesta de un micrófono en función de la presión aplicada a su diafragma. Existen tres procedimientos característicos para realizar este calibrado, a los que pasaremos revista sucesivamente.

a) *Procedimiento del pistón.* Se acopla al micrófono una cámara que tiene un pequeño émbolo, el cual se desplaza siguiendo un movimiento sinusoidal.

De esta forma, las variaciones de dimensión de la pequeña cámara formada entre membrana y pistón, se transformarán en variaciones

sinusoidales de presión acústica, y haciendo la hipótesis de que por ser la amplitud de las vibraciones mecánicas muy pequeñas y las variaciones de calor despreciables — o sea, la transformación del flúido gaseoso encerrado en la cámara, adiabática —, se puede calcular el incremento de presión de la siguiente forma: Sea

P la presión instantánea.
P_o la presión normal.
V_o el volumen normal de la cámara.
γ la relación entre los calores específicos a presión y a volumen constante del flúido (1,4 para los gases perfectos y el aire), utilizando una propiedad termodinámica

$$\frac{P}{P_o} = \left(1 + \frac{\Delta V}{V_o}\right)^{-\gamma} \simeq 1 - \gamma \frac{\Delta V}{V_o}$$

$$\Delta P = P - P_o = - P_o \gamma \frac{\Delta V}{V_o}$$

y llamando a al desplazamiento del pistón y S a su superficie:

$$\Delta P = \frac{\gamma P_o a S}{V_o}$$

Por este procedimiento se calcula el valor máximo del incremento de presión midiendo a continuación la tensión eléctrica a la salida del mismo con un voltímetro de válvula amplificador.

Este método sólo vale para frecuencias bajas: unos 200 c/s solamente.

Como la transformación no es exactamente adiabática, deben hacerse correcciones, y WENTE aconseja la utilización de la fórmula

$$\Delta P = \frac{\gamma P_o S a}{V_o} \left[1 - \frac{S'}{\alpha V_o} + \frac{S'^2}{2 \alpha^2 V_o^2}\right]^{1/2}$$

siendo:

S' la superficie metálica de las paredes.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega C_p}{2K}}$$

K conductibilidad térmica del gas.
C_p calor específico del gas a presión constante.
ω pulsación.

b) *Termófono.* Otro procedimiento muy utilizado es el del termófono.

Este aparato consiste en una cápsula que se puede acoplar al micrófono a ensayar y que está llena de un gas buen conductor del calor.

Dentro de la cápsula se disponen dos cintas de platino de $7 \cdot 10^{-4}$ milímetros de espesor que constituyen parte de un circuito eléctrico, que se completa en el exterior.

Cuando por las cintas pase una corriente eléctrica de intensidad sinusoidal y pulsación ω, la temperatura del gas y, por tanto, la presión del mismo, variará proporcionalmente al cuadrado de la intensidad de la corriente, o sea, sinusoidalmente a una frecuencia doble.

Si la intensidad alterna disponible es pequeña, conviene superponer una continua.

BALLANTINE da la siguiente fórmula para calcular las variaciones de presión en el termófono cuando las dimensiones de aquél son despreciables en comparación con la longitud de onda del sonido correspondiente a la frecuencia de la corriente considerada:

$$\Delta P = \frac{2\,S}{\omega\, m\, C V A\, a} \cdot \frac{0{,}48\, I_0\, I_1 R}{\sqrt{B}}$$

siendo:

$$B = \left(1 - \frac{4\,K\,S}{\omega\, C V A}\right)^2 + \left(1 + \frac{4\,S}{V A\, a} + \frac{4\,K a S}{\omega\, C} + \frac{4\,K\,S^2}{\omega\, C V A}\right)^2$$

$$A = \frac{T}{T_0}\,\frac{\gamma}{\gamma - 1}\ ,, \quad m = (\gamma - 1)\,\frac{T_0}{\gamma\, P_0}\ ,,$$

C capacidad calorífica total de las cintas.
I_0 componente continua en amperios.
I_1 componente alterna en amperios.
R resistencia de la cinta en ohmios.
T_0 temperatura media de las cintas en grados absolutos.
C_p calor específico del gas a presión constante.
K conductividad térmica del gas.
S área de una cara de las cintas en cm^2.
V volumen de la cámara en cm^3.
a ya se definió anteriormente.

c) Procedimientos eléctricos. Este caso únicamente se aplica cuando el micrófono utilizado tiene un diafragma metálico. Se monta enfrente de dicho diafragma y próximo a él un electrodo en forma de rejilla, aplicándose entre el electrodo y el diafragma una diferencia de potencial. Es evidente que estos dos elementos se atraerán con una fuerza calculable en función de los parámetros geométricos del sistema.

La presión así aplicada al diafragma cuando dicha diferencia de potencial está formada por un componente continuo E_0 superpuesto con uno alterno de amplitud E y pulsación ω, es de la forma

$$\Delta P = 8{,}05 \cdot 10^{-7}\ E_0 \cdot E \cdot M \times \frac{1}{d^2}\ ,$$

siendo las unidades dina por cm^2 volt y cm.

M es una constante que depende de la forma geométrica de la rejilla.

Debe observarse que el incremento de ΔP es independiente de la frecuencia. Este procedimiento se aplica especialmente al caso de micrófono electrostático.

Curvas de respuesta y calibrado en función de la presión acústica existente en un punto de la base entre la colocación del micrófono. Muchas veces se utilizan medios ópticos para hacer esta medida, observando interferencias que se pueden producir entre dos rayos luminosos que proceden de un mismo foco, uno de los cuales atraviesa el aire en reposo, y el otro al propagarse a través del aire alternativamente comprimido y enrarecido por ondas acústicas.

Las franjas de interferencia que se forman oscilan al ritmo de los cambios periódicos de densidades del aire atravesado por los rayos, y por medio de un registro fotográfico de estas franjas sobre una emulsión sensible que se desplaza a velocidades constantes por medio de un aparato de relojería, nos dará una presentación de la forma de las ondas acústicas de presión, y midiendo sobre ella veremos los valores máximos de esa magnitud. Este método no es muy sensible.

Existe otro procedimiento que utiliza el disco de Rayleigh. Es un disco muy delgado de mica o vidrio y de un diámetro de unos 5 mm. Está suspendido por medio de un hilo de cuarzo, quedando sus caras verticales. Si se sumerge este aparato en un flúido que se mueva, sus caras tendrán que ponerse paralelas con la dirección de la velocidad. La dirección del desplazamiento no varía al cambiar el sentido del flujo, y así el desplazamiento se mantiene aunque el flujo sea sinusoidal.

König ha calculado el par continuo que se ejerce sobre el disco sumergido en un flúido en movimiento de velocidad V y sin viscosidad; su valor es

$$F = \frac{1}{6} d_o d^3 \cdot V^2 \operatorname{sen} 2\,\theta,$$

siendo:

d_o la densidad del flúido.

d el diámetro del disco.

θ el ángulo formado por la normal a las caras del disco con la dirección de la velocidad.

Al variar la velocidad sinusoidalmente con el tiempo, el valor medio del par se obtiene sustituyendo en la fórmula anterior, en lugar de V, su valor eficaz.

En este caso, el par se compone de un término continuo según el valor medio indicado, y de una componente alterna de pulsación doble que la de la velocidad.

Si la impedancia mecánica ofrecida para dicho sistema es muy elevada, la componente alterna puede despreciarse.

Para determinar la velocidad de las partículas en el campo acústico es preciso, además de conocer d_o y d, realizar una serie de medidas, así como también sabe la dirección de V, todo lo cual nos obliga a conocer la posición del foco sonoro. Si suspendemos el disco de una hebra de cuarzo, según indicamos, y es Φ el ángulo de tensión necesaria para que θ sea 45°, se tendrá

$$F = \frac{1}{6} d_o \cdot d^3 \cdot V_{eff}^2.$$

pudiéndose determinar V_{eff} si se tiene el valor de F.

Al suprimir el campo acústico, el disco vuelve a su posición de reposo, girando un ángulo igual a θ, que puede medirse fácilmente por el método de reflexión, para lo cual se platea una de las caras del disco. Conocida la constante de torsión de la hebra de cuarzo es como se halla F.

Altavoces. En los altavoces se realizan fundamentalmente los siguientes ensayos:

a) Características de respuesta:

Se llama respuesta de un altavoz a la indicación que utilizamos como medida del sonido por él producido para una posición determinada y en ciertas condiciones acústicas y de potencia eléctrica y frecuencias aplicadas anteriormente.

Se llama respuesta absoluta a la relación entre la presión acústica en un punto de la base y una raíz cuadrada de la potencia acústica que aparentemente toma el altavoz. Vendrá dada entonces por la ecuación siguiente:

$$r = \frac{P}{\sqrt{W}} = \frac{P}{\dfrac{E}{\sqrt{Z}}} = \frac{P\sqrt{Z}}{E}$$

La respuesta absoluta se mide en unidades logarítmicas con respecto a un nivel arbitrario, utilizando como referencia un voltio, un ohmio y una dina por cm², siendo entonces la fórmula:

$$r = 20 \log_{10} \frac{P\sqrt{Z}}{E}$$

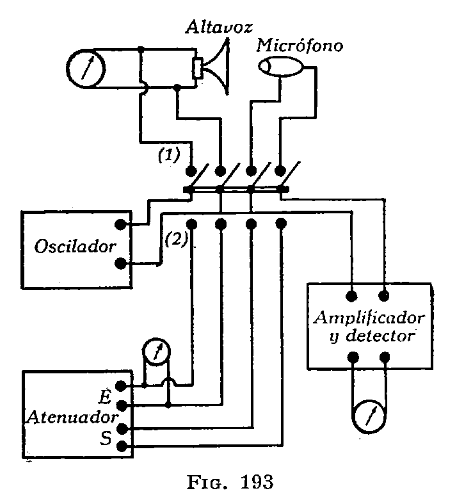


FIG. 193

Entre las causas que producen distorsiones en los altavoces, la más importante es la lineal de amplitud, y esto nos obliga a conocer la variación de la respuesta con la frecuencia, o sea, la característica respuesta, frecuencia.

Se pueden considerar una infinidad de características frecuencia-respuesta, pero lo más conveniente es la que da la respuesta absoluta.

Se obtiene aplicando al altavoz un voltaje fijo y midiendo para cada frecuencia la presión acústica originada y la impedancia, llevando estos datos a la ecuación primera, dada en este capítulo.

La presión se mide por los procedimientos dichos al hablar de los micrófonos, y las medidas de impedancia se realizan como más adelante indicaremos.

En la figura 193 se indica el conjunto de los aparatos precisos, así como la conexión entre ellos.

Colocado el conmutador en la posición 1, ajustamos la potencia de salida del oscilador hasta obtener en el altavoz el voltaje preciso. A continuación se ajusta la ganancia del amplificador hasta una lectura hacia la mitad de la escala del indicador de salida. Se lleva ahora el conmutador a la posición 2 y se regula la pérdida de transmisión hasta obtener en el indicador de salida la misma desviación que anteriormente. Es claro que el voltaje aplicado a la entrada del amplificador es idéntico en ambos casos, pero en este 2.° es conocido, puesto que se deduce de la lectura en el aparato de medida y de la pérdida introducida para el atenuador; como consecuencia, conoceremos el voltaje producido por el micrófono en la medida previa.

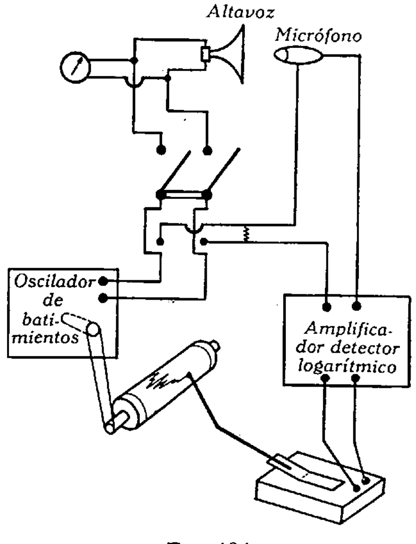


FIG. 194

Si conocemos la curva de calibrado absoluto del micrófono, deduciremos el valor de la presión acústica generada, que es la que se quería calcular.

Este procedimiento es lento, y se introducen numerosos errores, lo que da a las características muchas desigualdades, siendo conveniente realizar numerosísimas pruebas en un margen de frecuencias amplio, pero de las frecuencias próximas entre sí. Hay dispositivos para obtención automática de estas curvas.

Uno muy utilizado es el que se indica en la figura 194. El oscilador de baja frecuencia es de batimientos. Se obtiene la variación de frecuencia al variar el condensador que está acoplado mecánicamente a un tambor giratorio sobre el que se arrolla el papel en que se dibuja la característica. Dicho condensador tiene tal forma, que los ángulos girados por el tambor son proporcionales a los logaritmos de la relación de frecuencias correspondientes, obteniéndose así la curva en escala logarítmica de frecuencias.

El detector es logarítmico y el amplificador lineal, por lo que la división del aparato de medida será proporcional al logarítmo de la presión acústica.

El «estilo» impresor se maneja a mano por el operador de forma que las lecturas coincidan con las posiciones de las agujas del aparato de medida. El método no da respuesta absoluta, sino un valor en dB sobre un determinado nivel.

A veces se sustituye el tambor giratorio por una banda fotosensible que se desplaza a distancias proporcionales a los logaritmos de la relación de frecuencias original y final. El registrador será ahora un haz luminoso que se refleja en un galvanómetro de espejo, cuya bobina está recorrida por corriente de salida del detector logarítmico.

Influencia de las condiciones en que se realiza la experiencia. Es muy interesante considerar las condiciones acústicas del local donde estas experiencias se realizan. Si se hacen en un local cerrado, al micrófono llegará no solamente el sonido directo, sino también el reflejado, es decir, que tendrán gran importancia los tiempos de reverberación del mismo, y así un mismo altavoz utilizado en local diferente producirá características distintas.

Si se desea que la característica indique el comportamiento del altavoz sin que venga afectado por las condiciones del local, se deben realizar las pruebas al aire libre. En este caso, el micrófono y altavoz se colocan lejos de toda superficie reflectora, y convenientemente para que el único sonido que incida en el micrófono sea el directo. Para evitar también la reflexión sobre los suelos, estos aparatos se colocarán en unos mástiles finos y resistentes y a una altura mínima de 6 m; el micrófono enfrentado al altavoz y a una distancia de 1,5 m, contada desde su eje si el altavoz no es mayor de 0,75 m.

Si las dimensiones transversales del radiador exceden de este límite, se aconseja que la distancia sea el menor múltiplo de 1,5 m, que resulta mayor que el doble de dichas dimensiones transversales.

Si el altavoz funcionara con una pantalla acústica, debe medirse con una análoga y colocada en el centro del mismo.

En este tipo de medida hay que tener muy en cuenta el nivel de ruidos existentes en el puesto de ensayo, para lo cual debemos alejarnos de centros urbanos muy afectados por dichos ruidos.

Como presentan dificultades las medidas al aire libre, se hacen en locales especialmente diseñados según características recomendadas por las casas constructoras, y que suelen ser las siguientes:

Dimensiones del local en la relación 2, 4, 5, volumen mínimo 3800 pies^3. Se evitará cuidadosamente la formación de ondas estacionarias y se cubrirán las paredes de material absorbente.

Medidas de impedancia. Este tipo de medida se realiza por los procedimientos normales que se indican en los tratados de electrometría, pero es conveniente tomar precauciones especiales, sobre todo al darnos cuenta de que la impedancia del altavoz varía con el valor de la corriente que los atraviesa, y por eso se realizarán las medidas en las mismas condiciones que las normales de trabajo.

Si interesa simplemente el módulo de la impedancia, se puede utilizar el método de voltímetro y amperímetro; si se quieren conocer separadamente las dos componentes, resistiva y reactiva, se utilizan puentes de medidas de impedancia de cualquier tipo de los normales.

in embargo, estos puentes deben permitir el paso de corrientes intensas, que son las que alimentan las bobinas de los altavoces.

En el caso de los altavoces de bobina móvil, la temperatura de éstos aumenta con el funcionamiento, y por este calor disipado por el movimiento del mismo debe procurarse disponer de medio adecuado que nos haga la temperatura constante.

Como la impedancia varía con la frecuencia, se precisa la obtención de curvas características, impedancia-frecuencia, en las que se indicará

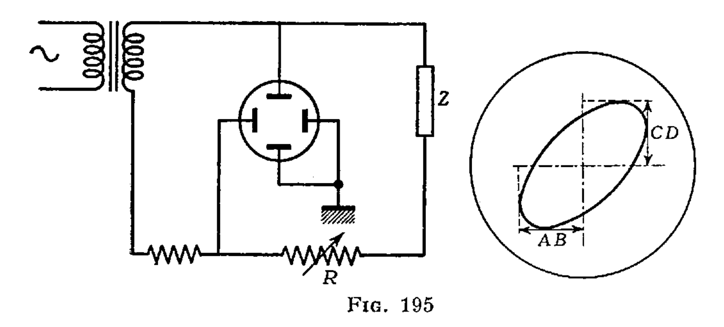


FIG. 195

el valor de la corriente con que se hizo la medida. Un procedimiento muy utilizado para medir impedancias en los altavoces es el oscilográfico, disponiéndose los elementos según se indica en la figura 195.

La tensión desviadora de las placas verticales es ZI, siendo I la corriente que recorre el circuito; la tensión desviadora horizontal es RI, y se verifica:

$$\frac{Z}{R_1} = \frac{AB}{CD} \quad ,, \quad Z = R_1 \frac{AB}{CD}$$

A veces conviene medir la impedancia con el sistema mecánico inmóvil, lo cual no es fácil para muy altas frecuencias, ya que los desplazamientos en este caso son pequeñísimos. Un procedimiento para conseguirlo es sumergir el conjunto en parafina fundida, que, al solidificarse, produce un bloqueo muy eficaz.

Distorsión no lineal. En los altavoces no electrodinámicos y que introducen armónicos apreciables, interesa conocer la proporción de los mismos. En la figura 196 se indica el montaje de una medida de este tipo. La señal producida por el oscilador (que debe ser un oscilador carente de armónicos), pasa por un filtro paso-bajo con objeto de eliminar las frecuencias bajas, generalmente producidas por señales de red, y van a un conmutador que en la posición inferior lleva la señal al altavoz. En la posición superior dicho conmutador lleva la señal a un atenuador variable y a un amplificador, y la salida va a un analizador de ondas. El amplificador debe ser también completamente lineal.

Analizada la señal del oscilador y conectados sus porcentajes de armónicos, pasaremos el conmutador a la posición inferior, con lo cual el altavoz funcionará y la perturbación será quitada por el micrófono, cuya salida se analiza por la red de la derecha.

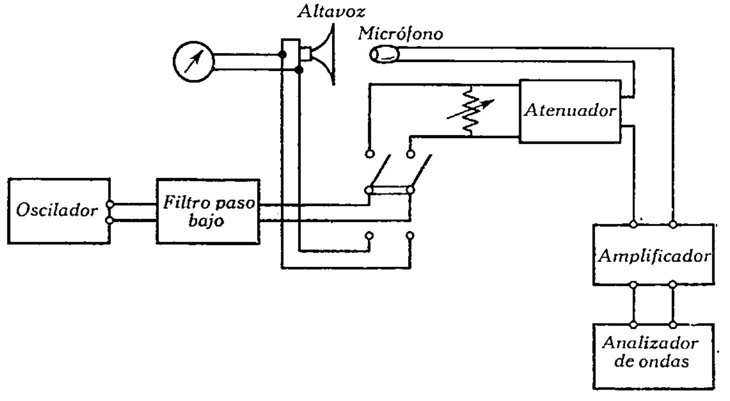


Fig. 196

De esta forma compararemos las dos medidas, que nos darán idea de la distorsión del altavoz. Es claro que el micrófono no debe tampoco introducir armónicos.

Eficacia. Para conocer la eficacia de un altavoz precisaremos conocer la potencia acústica radiada y la energía eléctrica que se le comunica. La energía eléctrica que consume valdrá

$$W = R I^2 \quad ,,$$

siendo R la componente resistiva de la impedancia que ofrece al mismo, e I la intensidad que lo atraviesa; el problema se reduce entonces a una medida de impedancia por los procedimientos dichos.

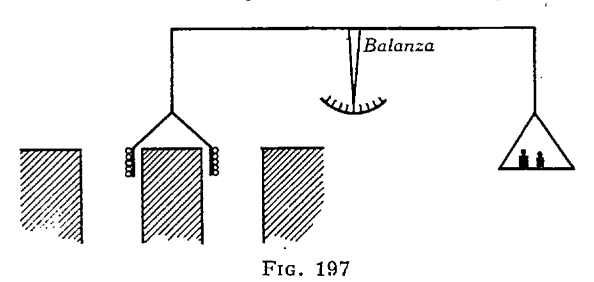


Fig. 197

Para conocer la energía acústica radiada se puede recurrir al procedimiento directo, consistente en calcular el flujo de energía a través de una superficie que envuelva al altavoz, y ya sabemos que el flujo de energía se conoce cuando se ha determinado el incremento de presión y la velocidad, así como la fase entre estas magnitudes.

Este procedimiento es malo, y se recurre siempre al procedimiento indirecto.

La potencia acústica es la diferencia de las potencias eléctricas tomadas por el altavoz, cuando vibre su diafragma en el aire y cuando esté inmovilizado, siempre que admitamos que la resistencia del sistema mecánico del altavoz depende exclusivamente del fenómeno de radiación del sonido.

Teniendo en cuenta lo anterior, y viendo que las potencias eléctricas mencionadas se pueden calcular siempre que se hayan determinado las impedancias en ambos casos, tendremos el problema resuelto y reducido a un caso de medida de impedancias.

Medidas de campo en los altavoces de bobina móvil. Se reduce la medida del campo a la medida de una fuerza utilizando una balanza especial. En la figura 197 se ve claramente la disposición y se deduce el método operatorio.

Se dispone una bobina de prueba por la que pasa una corriente de intensidad I; la fuerza con que es solicitada hacia abajo valdrá

$$F = 2\pi r n H I,$$

siendo:

r el radio de la bobina.
n el número de espiras.
H el campo en el entrehierro.

Y como F es determinado por el peso que debe ponerse en el otro platillo para equilibrar la balanza, se determina H.

Existen otros métodos balísticos que, utilizando aparatos adecuados (fluxómetros), permiten la medida del flujo magnético, así como la distribución del campo.

APÉNDICE

Ejercicio 1. La señal de un oscilador de audiofrecuencia no es sinusoidal pura; midiendo con un analizador de ondas se ha obtenido:

Tensión del fundamental	....	3 voltios
» » 2.° armónico	....	0,02 voltios
» » 3.° »	....	0,1 voltio

Las tensiones de los demás armónicos son despreciables. Calcular el coeficiente de distorsión:

Solución:

$$D = \sqrt{\frac{E_2^2 + E_3^2}{E_1^2}} = \sqrt{\frac{10^{-2} + 4 \cdot 10^{-4}}{9}} \simeq \frac{1}{30} \quad ,,$$

Ejercicio 2. Calcular la velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura de 20° y una atmósfera de presión.

Solución:

Haciendo uso de la fórmula (4) y siguientes:

$$V_{20^\circ} = \sqrt{\frac{P_0 \gamma}{d_0}} \cdot \sqrt{1 + \frac{20}{273}} =$$

$$= \sqrt{\frac{76 \times 13{,}56 \times 981 \times 1{,}4}{0{,}001293}} \cdot \sqrt{1 + \frac{20}{273}} \simeq$$

$= 331{,}2 + 0{,}6 \times 20 = 332{,}4$ m/seg.

Ejercicio 3. Calcular la velocidad de propagación del sonido en una atmósfera de hidrógeno a la temperatura de 50°.

Solución:

$$v = \sqrt{\frac{76 \times 13{,}59 \times 981 \left(1 + \frac{1}{273} \times 50\right) \times 1{,}4}{0{,}001293 \times \frac{1}{14{,}49}}} =$$

$$= 129000 \text{ cm/seg} = 1290 \text{ m/seg}$$

puesto que la densidad del hidrógeno es 14,49 veces menor que la del aire.

Ejercicio 4. Un foco sonoro vibra con una amplitud de 0,01 cm y una frecuencia de 800 c/s. Calcular: 1.°, la ecuación del estado vibratorio de un punto situado a 10 m del foco perturbador; 2.°, la velocidad de ese punto del medio en el instante $t = 0{,}16''$, después de producirse el sonido; 3.°, el incremento máximo de presión que se sufre debido al sonido; 4.°, la densidad de energía acústica; 5.°, el

flujo de energía en la unidad de tiempo a través de una superficie de 1 dm². Se admite que no hay atenuación. Las condiciones atmosféricas son 20° y 740 mm de mercurio de presión.

Solución:

1.° La pulsación será

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3{,}14 \times 800 \simeq 5000.$$

La ecuación del foco sonoro es

$$s = a \text{ sen } \omega t = 0{,}01 \text{ sen } 5000\, t.$$

La velocidad de propagación en este caso vale

$$v = \sqrt{\frac{P\gamma}{d}} = \sqrt{\frac{74 \times 13{,}56 \times 981 \times 1{,}4}{0{,}001293} \times \left(1 + \frac{20}{273}\right)} = 340\,00 \text{ cm/sg},$$

y la ecuación del punto:

$$e = 0{,}01 \text{ sen } \omega \left(t - \frac{x}{v}\right) = 0{,}01 \text{ sen } 5000 \left(t - \frac{1}{34}\right) \;,,$$

2.°

$$u = E\omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v}\right) = 0{,}01 \cdot 5000 \cos 5000 \left(0{,}16 - \frac{1}{34}\right) = 50 \cos 652{,}95\, (rad^s)$$

y como 652,95 radianes equivalen a 374 00°,

$$u = 50 \cos 40° = 35{,}8 \text{ cm/seg.}$$

3.°

$$\Delta P = P_o\, \gamma \frac{E\omega}{v_1} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v_1}\right) \;,,$$

y el valor máximo será

$$\Delta P_{\text{máx}} = 74 \times 13{,}56 \times 981 \times 1{,}4 \times \frac{0{,}01 \times 5000}{34\,000} = 2000 \text{ dinas/cm}^2.$$

4.° La densidad de energía varía con el tiempo sinusoidalmente, y el valor de la densidad media de energía será:

$$I_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{E^2 \omega^2 P_o \gamma}{v_1^2} = \frac{10^{-4} \cdot 25 \cdot 10^6 \times 74 \times 13{,}56 \times 981 \times 1{,}4}{2 \times 34^2 \times 10^6} =$$

$$= 1{,}47 \text{ ergios/cm}^3$$

5.°

$$\Phi = \frac{1}{2} E^2 \omega^2 v_1 d_o S = \frac{1}{2} \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 34 \cdot 10^3 \cdot \frac{0{,}001293}{1 + \frac{273}{20}} \cdot 100 =$$

$$= 55\,000 \text{ ergios/seg} = 5{,}5 \text{ miliwatios.}$$

Ejercicio 5. Una onda plana y progresiva produce un incremento de presión de 5 milibarias. Calcúlense los valores de la densidad media de energía y flujo medio de energía. Se admiten condiciones normales atmosféricas.

Solución:

Como

$$\Delta P_m = P_o\, \gamma \frac{E\omega}{v_1} \;,, \quad E\omega = \frac{5 \cdot 10^{-3} \times 331 \cdot 10^2}{760 \times 1{,}356 \times 981 \times 1{,}4}$$

y entonces:

$$I_m = \frac{1}{2} d_o E^2 \omega^2 = \frac{1}{2} 0{,}001293 \frac{25 \cdot 10^{-6} \times 331^2 \cdot 10^4}{76^2 \cdot 10^2 \times 1{,}356^2 \times 981^2 \times 1{,}4^2} =$$

$$= 1{,}7 \cdot 10^{-11} \text{ ergios/cm}^3$$

$$\Phi_m = I_m \cdot v_1 = 1{,}7 \cdot 10^{-11} \times 331 \times 10^2 = 56 \cdot 10^{-8} \text{ ergios/seg/cm}^2.$$

Ejercicio 6. El flujo medio de energía por unidad de superficie está a —90 dB respecto al nivel de 1μ watio/cm².

Calcular el valor máximo del incremento de presión acústica en un punto de esa superficie.

Solución:

Sabemos que $$N_{dB} = 10 \log_{10} \frac{w_1}{w_2} \quad ,,$$

$$90 = 10 \log_{10} \frac{1}{w} \quad ,, \quad \frac{1}{w} = 10^{10} \quad ,,$$

$$\Phi = 10^{-10} = I_m \cdot v_1 = \frac{1}{2} d_o E^2 \omega_1^2 v_1 \quad ,,$$

$$\Delta P_m = P_o \gamma \frac{E \omega}{v_1} = \frac{P_o \gamma}{v_1} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-10}}{d_o v_1}} = \sqrt{2 \times 10^{-10} v_1 d_o} =$$

$$= \sqrt{2 \times 10^{-10} \cdot 331 \times 10^2 \cdot 0{,}00129} = 9{,}3 \cdot 10^{-5} \text{ barias.}$$

Ejercicio 7. Se tiene un foco sonoro que puede considerarse como puntual y que produce una nota de frecuencia 800 c/s. La perturbación se propaga en un medio isotropo e indefinido. Calcular los valores máximos del incremento de presión en un punto del que llega la perturbación, sabiendo que la distancia es 20 m y que la energía del vibrador es 2 watios.

Solución:

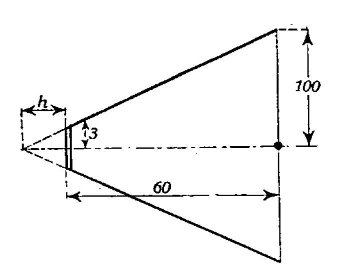
Haciendo uso de la fórmula (32)

$$F = \sqrt{\frac{w \, 8 \pi \, v_1}{w^2 d_o}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^7 \times 8 \times 3{,}14 \times 331 \times 10^2}{25 \cdot 10^6 \times 1{,}293 \times 10^{-3}}} = 22 \times 10^3$$

y entonces sustituyendo en (31) y considerando solamente la parte no periódica

$$\Delta P = \frac{j \, \omega \, d_o \, F}{4 \pi r} = \frac{j \, 5000 \times 0{,}001293 \times 22 \times 10^3}{4 \pi \times 2 \times 10^3} \quad ,, \text{ cuyo módulo es}$$

$$|\Delta P| = 5{,}7 \text{ barias.}$$



Ejercicio 8. En el fondo de una bocina cónica cuyo radio en la boca es 1 m, se coloca un disco rígido de 6 cm de radio. Calcular la amplitud del movimiento vibratorio del disco sabiendo que la longitud de la bocina es 0,06 m y que la potencia radiada es 2 watios. Calcúlese a las frecuencias de 800 c/s y 10 000 c/s.

Solución:

Utilizando la fórmula (44)

$$W = \frac{d_o \, \omega^4 \, R^2 \, a^2 \, h}{v_1}$$

y considerando la bocina como indefinida:

$$\left.\begin{array}{l} a = \sqrt{\dfrac{W\, v_1}{d_0\, \omega^4\, R^2\, h}} \\ \dfrac{60 + h}{h} = \dfrac{110}{3} \;,,\; h = \dfrac{180}{97} \end{array}\right\} \quad a = \sqrt{\dfrac{2 \times 10^7 \times 331 \times 10^2}{1{,}293 \times 10^{-3} \times 9 \times \dfrac{180}{97}}} \times \dfrac{1}{\omega^2} = \dfrac{5{,}6 \times 10^6}{\omega^2}$$

$$\text{y amplitud}_{800} = \frac{5{,}6 \times 10^6 \sqrt{2}}{25 \times 10^6} = 0{,}32 \text{ cm}$$

$$\text{amplitud}_{10\,000} = \frac{5{,}6 \times 10^6 \sqrt{2}}{4\pi^2 \times 10^8} = 1{,}98 \times 10^{-3} \text{ cm.}$$

Ejercicio 9. En el fondo de una bocina exponencial de suficiente longitud para ser considerada como indefinida, hay un disco rígido de 6 cm de radio que vibra periódicamente, de modo que su amplitud no varía. Calcular el máximo valor del factor de forma de la bocina que cumpla la condición de que la potencia radiada a 10 000 c/s esté 2 dB por encima de la radiada a 1000 c/s.

Solución:

$$2 = 10 \log_{10} \frac{w_{10\,000}}{w_{1000}} \;,,\; \frac{w_{10\,000}}{w_{1000}} = 1{,}58 \;,,$$

Haciendo uso de la (50)

$$w_{10\,000} = d_0\, \pi\, R^2\, \omega^2\, v_1\, a^2 \sqrt{1 - \frac{m^2\, v_1^2}{4\, \omega^2}}$$

$$w_{1000} = d_0\, \pi\, R^2\, \omega'\, v_1\, a^2 \sqrt{1 - \frac{m^2\, v_1^2}{4\, \omega'^2}}$$

$$1{,}58 = \frac{10^8}{10^6} \cdot \sqrt{\frac{1 - \dfrac{m^2\, v_1^2}{4\, \omega^2}}{1 - \dfrac{m^2\, v_1^2}{4\, \omega'^2}}} \;,,\; m = 3{,}8 \;,,$$

Ejercicio 10. Calcular el valor del factor de forma de una bocina exponencial cuya frecuencia de corte es de 50 c/s.

Solución:

Utilizando la (49):

$$f = \frac{v_1\, m}{4\pi} \;,,\quad m = \frac{4\pi \times 50}{331 \times 10^2} = 0{,}0184.$$

Ejercicio 11. Calcular el factor de forma de la bocina exponencial del problema 9, con la condición de que la sección a 2 m del disco sea igual a 1 m².

Solución:

$$S_x = S_0\, e^{mx} \;,,\quad 10\,000 = \pi \times 36\, e^{m \times 200}$$

$$m = \log_e \frac{10\,000}{\pi \times 36} \times \frac{1}{200} = 0{,}0336.$$

Ejercicio 12. La sensibilidad de un micrófono electrostático que trabaja sobre una impedancia de 5 megohmios es de 3 milivoltios/baria. Calcular la presión acústica que debe actuar sobre él, para obtener una señal de —75 dB sobre el nivel de 6 miliwatios.

Solución:

La potencia de la señal de salida será:

$$-75 = 10 \log_{10} \frac{w}{6 \cdot 10^{-3}} \quad ,, \quad w = 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ watios;}$$

la tensión que debe producir el micrófono:

$$\frac{v^2}{R} = 1,9 \cdot 10^{-10} \quad ,, \quad v = \sqrt{5 \cdot 10^6 \cdot 1,9 \cdot 10^{-10}} = 3,08 \cdot 10^{-2} \text{ voltios;}$$

y la presión acústica:

$$\Delta P = \frac{V}{S} = \frac{3,08 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^{-3}} = 10,2 \text{ barias} \quad ,,$$

Ejercicio 13. El amplificador previo que sirve una línea de programa debe entregar 100 miliwatios sobre una línea de 600 ohmios. Este amplificador tiene dos válvulas, cuyas ganancias son 80 y 36 respectivamente, y sirve a un micrófono piezoeléctrico de sensibilidad 0,125 milivoltios/baria. Calcular el valor de la resistencia de entrada al amplificador si el valor de la relación señal/ruido a la entrada, por efecto Nyquist o térmico, vale 100. Calcular también la presión acústica que actúa sobre el micrófono.

Solución (1):

1.° La tensión de la señal a la salida del amplificador es:

$$\frac{V_s^2}{R} = 0,1 \quad ,, \quad V_s = \sqrt{600 \times 0,1} = 7,73 \text{ voltios}$$

La señal de entrada al amplificador:

$$\frac{7,73}{v_e} = 80 \times 36 \quad ,, \quad v_e = 0,00269 \text{ voltios} \quad ,,$$

La tensión de ruido debido a la agitación térmica en una resistencia y como consecuencia del movimiento caótico de los electrones vale

$$V_N = \sqrt{4\, K \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} = \sqrt{4 \cdot 1,374 \cdot 10^{-23} \, (273 + 15) \cdot R \cdot 10^4}$$

luego:

$$\frac{2,69 \cdot 10^{-3}}{V_N} = 100 \quad ,, \quad R = 4,65 \cdot 10^6 \text{ ohmios}$$

2.°

$$\Delta P = \frac{2,69 \cdot 10^{-3}}{0,125 \cdot 10^{-3}} = 21,6 \text{ barias.}$$

Ejercicio 14. En el fondo de una bocina exponencial de suficiente longitud para poder ser considerada como indefinida, vibra un disco de 5 cm de radio a la frecuencia de 50 c/s. La frecuencia de corte de esta bobina es 22 c/s. Calcular la relación que existe entre la resistencia acústica que ofrece la bocina en las condiciones anteriores y la que ofrecería si la frecuencia creciese indefinidamente ($v_1 = 344$ m/s).

---

(1) Debe observarse que los datos de sensibilidad y niveles de salida de los micrófonos suelen darse de una forma algo ambigua, pues siempre debían completarse con el valor de la impedancia sobre que trabajan (aunque se supone lo hacen sobre una idéntica a la suya interior), y el valor de la presión acústica que sobre ellos actúa. Se ha estimado también una banda de paso de 10 000 ciclos. K es la constante de Boltzman.

Solución:

El factor de forma, o de crecimiento, será:

$$f_c = \frac{m\,v_1}{4\pi} \;,, \quad m = \frac{4 \times 3{,}14 \times 22}{344 \times 10^2} = 8 \times 10^{-3}.$$

Haciendo uso de (47), de la que tomamos la parte real:

$$R_A = \frac{v_1\,d_o}{S_o}\sqrt{1 - \frac{v_1^2\,m^2}{4\,\omega^2}} \;,, \text{ que para } f \to \infty, \text{ tiende a } \frac{v_1\,d_o}{S_o}$$

luego

$$\frac{R_{A\,50}}{R_{A\,\infty}} = \frac{\dfrac{v_1\,d_o}{S_o}\sqrt{1 - \dfrac{v_1^2\,m^2}{4\,\omega^2}}}{\dfrac{v_1\,d_o}{S_o}} = \sqrt{1 - \frac{344^2 \cdot 10^4 \times 64 \times 10^{-6}}{4 \times 4 \times 3{,}14^2 \times 25 \times 10^2}} = 0{,}96.$$

Ejercicio 15. La afinidad electrónica del potasio es 2,01 voltios; cuál es la velocidad máxima a que pueden salir los fotoelectrones cuando dicho cuerpo se ilumine con luz de longitud de onda 5500 Ar (carga electrón = $1{,}6 \cdot 10^{-20}$ u. e. m.) (masa electrón = $9 \cdot 10^{-28}$ gramos) (constante Boltzmann = $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ ergios/s).

Solución:

Siendo

$$P = \frac{\Phi}{e} = 2{,}01 \;,, \; \Phi = 2{,}01 \cdot 10^8 \text{ (u. c. m.)} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-20} = 3{,}2 \cdot 10^{-12} \;,,$$

$$\frac{1}{2}\, m\, v^2_{\text{lím}} = Kf - \Phi \;,, \; V_{\text{lím}} = \sqrt{\frac{2\,(Kf - \Phi)}{m}} \;,, \qquad (75)$$

como

$$\lambda = \frac{v}{f} \;,, \; f = \frac{3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sg}}{55 \cdot 10^{-8} \text{ cm}} \;,,$$

$$V_{\text{lím}} = \sqrt{\frac{2\left(6{,}55 \cdot 10^{-27} \cdot \dfrac{3}{55} \cdot 10^{16} - 3{,}2 \cdot 10^{-12}\right)}{9 \cdot 10^{-28}}} = 28 \cdot 10^6 \text{ cm/sg} = 280 \text{ km/sg}.$$

Ejercicio 16. La frecuencia umbral del zinc es $9{,}2 \cdot 10^3$ megaciclos/s. Calcular la afinidad electrónica.

Solución:

Haciendo uso de (75'):

$$P = \frac{\Phi}{e} \;,, \; \Phi = Kf_h = P \cdot e \;,, \; P = \frac{Kf_h}{e} = \frac{6{,}55 \cdot 10^{-27} \times 9{,}2 \cdot 10^{14}}{1{,}6 \times 10^{-20}} = 3{,}76.$$

Ejercicio 17. Una célula fotoeléctrica al vacío de sensibilidad 1,6 μA/lumen está unida a un amplificador a través de una resistencia de 2 megohmios. Calcular: 1.°, la corriente que suministra la célula cuando actúa sobre ella un flujo permanente de 0,2 lumens; 2.°, voltaje de ruido producido en la resistencia de 2 megohmios, si la banda de paso está comprendida entre 30 y 8000 c/s y temperatura 15°; 3° ganancia del amplificador para disponer de 4 voltios a la salida cuando actúe sobre la célula un flujo sinusoidal de amplitud $4 \cdot 10^{-4}$ lumen, superpuesto a un flujo continuo.

Solución:

1.° $I = 1,6 \times 0,2 = 0,32$ microamperios.

2.°

$$e_n = \sqrt{4\,KTR\,(f_2 - f_1)} = \sqrt{4 \times 1,374 \times 10^{-23} \times (273+15) \times 2 \cdot 10^6\,(800 - 30)} =$$
$$= 15,9 \cdot 10^{-6} \text{ voltios} = 15,9 \text{ microvoltios.}$$

3.° Si actúa un flujo de amplitud $4 \cdot 10^{-4}$ lumen, la tensión de la señal en la resistencia de utilización es:

$$e_s = \frac{s\,f}{\sqrt{2}}\,R = \frac{1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-1} \times 4 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2}} \times 2 \cdot 10^6 \cdot 10^9 =$$
$$= 9,05 \cdot 10^{-4} \cdot \text{u. e. m.} = 9,05 \cdot 10^4 \text{ voltios}$$

$$\text{y ganancia} = 20 \log_{10} \frac{v_1}{v_2} = 20 \log_{10} \frac{4}{9,05 \cdot 10^{-4}} = 72,9 \text{ decibelios.}$$

Ejercicio 18. Una célula fotoeléctrica de sensibilidad 1,5 microamperios/lumen se acopla mediante una resistencia de un megohmio a un amplificador cuya válvula previa presenta una capacidad de entrada de 45 picofaradios. La célula tiene una capacidad entre electrodos de 5 picofaradios. El amplificador tiene una ganancia total en tensión de 40 decibelios. Calcular el voltaje disponible a la salida cuando actúe sobre la célula un flujo luminoso sinusoidal de frecuencia 10 000 c/s y cuyas elongaciones varían entre 1,5 y 2,5 lumens.

Solución:

La impedancia del circuito de entrada será efectivamente:

$$z = \sqrt{\frac{R}{1 + \omega^2\,C^2\,R^2}}\ ,,$$

y la tensión de la señal tendrá un valor máximo

$$v_2 = \frac{R\,S\,f}{\sqrt{1+\omega^2 C^2 R^2}} = \frac{10^6 \times 1,5 \cdot 10^{-6} \times \frac{2,5 - 1,5}{2}}{\sqrt{1 + 4\pi^2 \times 10^8 \times 50^2 \times 10^{-24} \cdot 10^{12}}} = 0,226 \text{ voltios}$$

y voltaje salida $\quad 40 = 20 \log_{10} \dfrac{v}{0,226}\ ,,\ v = 22,6$ voltios.

Ejercicio 19. En una célula Kerr se tienen las placas o electrodos de forma rectangular y separadas entre sí 4 mm, siendo sus dimensiones 5 cm en dirección del rayo luminoso y 3 cm de ancho. Calcular el voltaje óptimo a aplicar siendo la constante para el nitrobenzol $J = 503 \cdot 10^{-7}$ u. e. s.

Solución:

Utilizando (72): $\quad \Phi_e = KR^2 \operatorname{sen}^2 \pi\,l\,J \dfrac{E^2}{d^2}\ ,,$

y derivando

$$\Phi'_e = KR^2\,2 \operatorname{sen}\left(\pi\,l\,J \frac{E^2}{d^2}\right) \cos\left(\pi\,l\,J \frac{E^2}{d^2}\right) \pi\,l\,J\,\frac{2\,E}{d^2} =$$
$$= KR^2 \operatorname{sen}\left(2\,\pi\,l\,J \frac{E^2}{d^2}\right) \cdot \pi\,l\,J \cdot \frac{2\,E}{d^2}$$

$$\Phi''_e = K R^2 \frac{2\pi l J}{d^2} \left[\frac{4 E^2 \pi l J}{d^2} \cdot \cos\left(2\pi l J \frac{E^2}{d^2}\right) + \text{sen}\left(2\pi l J \frac{E^2}{d^2}\right)\right] = 0$$

de donde:

$$\text{tag}\left(2\pi l J \frac{E^2}{d^2}\right) = -\frac{4 E^2 \pi l J}{e^2} \quad ,, \quad \text{o sea,} \quad 2\pi l J \frac{E^2}{d^2} = 1{,}83 \text{ radianes,}$$

$$E = \sqrt{\frac{1{,}83 \cdot 0{,}4^2}{3{,}14 \cdot 503 \cdot 10^{-6}}} = 0{,}4 \cdot 10^3 \cdot 0{,}0341 = 13{,}6 \text{ u. e. s.} = 4080 \text{ voltios.}$$

EJERCICIO 20. En una habitación cuya forma es paralelepipédica y de dimensiones: largo = 4 m, ancho = 3 m y alto = 3 m, funciona un pequeño altavoz de 1 watio. Todas las paredes y aun el techo y suelo están cubiertos de un material de coeficiente de absorción $a = 0{,}2$. Calcular el tiempo que debe transcurrir desde que cesa de actuar el foco sonoro (una vez alcanzada la distribución difusa) hasta que la densidad media de energía vale $0{,}36 \cdot 10^{-4}$ ergios/cm³.

Solución:

Haciendo uso de (96) ,, y (97).
La densidad media de energía en régimen permanente será

$$I_o = \frac{4 E}{v_1 \Sigma a_i S_i} = \frac{4 \times 10^7}{331 \cdot 10^2 (2 \times 3 \times 3 + 4 \times 3 \times 4) 10^4 \times 0{,}2} =$$

$$= 0{,}915 \cdot 10^{-2} \text{ ergios/cm}^3;$$

y como

$$\frac{I_o}{I} = \frac{0{,}915 \cdot 10^{-2}}{0{,}36 \cdot 10^{-4}} = e^{-\frac{v_1 \Sigma a_i S_i}{4 V} t}$$

$$\frac{331 \cdot 10^2 \cdot 66 \cdot 0{,}2 \cdot 10^4}{4 \times 36 \times 10^6} t = \log_e 255 = 6{,}53 \quad ,, \quad t = 0{,}215 \text{ s.}$$

EJERCICIO 21. En un local de volumen 100 m² y absorción total $\Sigma a_i S_i = 54$ m² funciona un generador acústico de potencia 2 miliwatios y frecuencia 62,5 c/s. Una vez establecido el régimen permanente deja el foco de actuar. Calcular el tiempo que tarda en dejarse de oír el sonido.

Solución:

Utilizando la tabla de la figura (137).
El dintel de audibilidad corresponde a un flujo de energía de —44 dB sobre el nivel de 1 microwatio/cm²; luego valdrá:

$$-44 = 10 \log_{10} \frac{\Phi_h}{1} \quad ,, \quad \Phi_h = 4 \cdot 10^{-5} \mu\text{w/cm}^2;$$

la densidad media de energía que corresponde será:

$$= I \frac{\Phi_h}{v_1} = \frac{4 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-6} \cdot 10^7}{331 \times 10^2} = 12 \cdot 10^{-9} \text{ ergios/cm}^3.$$

En régimen permanente la densidad media de energía vale:

$$I_o = \frac{4 E}{v_1 \Sigma a_i S_i} = \frac{4 \times 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^7}{54 \times 10^4 \times 331 \cdot 10^2} = 45 \cdot 10^{-7} \text{ ergios/cm}^3,$$

y entonces, haciendo uso de (96),

$$\frac{I_0}{I} = \frac{45 \cdot 10^{-7}}{12 \cdot 10^{-9}} = e^{\frac{331 \cdot 10^2 \cdot 54 \cdot 10^4}{4 \cdot 10^3 \cdot 10^6} t} \quad ,, \quad t = \frac{4 \cdot 10^9}{54 \times 331 \cdot 10^6} \log_e 375 = 1{,}23 \text{ seg.}$$

EJERCICIO 22. En un local de dimensiones 3 × 4 × 4 m, revestido de un material absorbente ($\alpha = 0{,}1$) se tiene funcionando un receptor de radio en cuyo altavoz se disipan 2 watios eléctricos. Una vez establecida la distribución difusa cuando la señal que se emite es de 500 c/s, calcúlese la intensidad subjetiva percibida por un observador, sabiendo que el rendimiento del altavoz es del 3 % a esa frecuencia.

Solución:

Potencia acústica radiada = 0,03 × 2 = 0,06 watios acústicos.
La densidad media de energía en régimen permanente será

$$I_0 = \frac{4\,E}{\Sigma a_i\, S_i \cdot v_1} = \frac{4 \times 0{,}06 \cdot 10^7}{331 \cdot 10^2 \times 0{,}1 \times 90 \times 10^4} = 8{,}1 \cdot 10^{-4} \text{ ergios/cm}^3.$$

El flujo de energía que significa esta densidad será

$$\Phi = I_0\, v_1 = 8{,}1 \cdot 10^{-4} \times 331 \times 10^2 = 265 \text{ ergios/cm}^2\text{/sg.}$$

Para utilizar las tablas de la figura 137 es necesario expresar el flujo en dB sobre el nivel de 1 microwatio; luego:

$$N = 10 \log_{10} \frac{2{,}65}{1} = 4{,}2 \text{ dB } ,,$$

Utilizando las tablas, se observa que entre —11 y —21 decibelios para la frecuencia de 500 c/s, corresponde un incremento de 10 fonios ,, y como entre 4,2 y —11 hay una diferencia de 15,2 dB ,, el observador tendrá una impresión subjetiva de 80 + 15,2 = 95,2 fonios.

EJERCICIO 23. Un local de volumen 144 m³ y superficie 180 m² está cubierto por un material absorbente de coeficiente de absorción $\alpha = 0{,}2$. Calcular su tiempo de reverberación.

Solución:

$$T = 0{,}162 \frac{V}{\Sigma a_i\, S_i} = 0{,}162 \cdot \frac{144}{0{,}2 \times 180} = 0{,}648 \text{ segundos}\cdot$$

EJERCICIO 24. Calcular el tiempo de reverberación para la frecuencia de 512 c/s, de un cinematógrafo de forma paralelepipédica de dimensiones 30 × 15 × × 6 m. Sus paredes están cubiertas con un friso de madera hasta una altura de 2 m, y hasta el techo enlucido de yeso sobre ladrillo.

El techo está dado de yeso sobre listoncillo de madera, y el suelo es de losetas de corcho. El escenario tiene una abertura de 9 × 4 m y está cubierto por una cortina de terciopelo. Hay 500 sillas de madera con asiento y respaldo continuo sin tapizar.

Solución:

Superficies		*Absorciones*
Techo ...—30 × 15 = 450 m²	,,	$S_i\, a_i = 14{,}40$
Suelo .... 450 »	,,	$S_i\, a_i = 22{,}50$

Superficies			Absorciones
Paredes sin friso			
2[30(6 — 2)]	= 240 m²		
15 (6 — 2)	= 60 »		$S_i\,a_i$ = 6,84
90 — 36 — 12	= 42 »		
Paredes con friso 81 × 2	= 162 m.²		$S_i\,a_i$ = 16,20
Escenario ....9 × 4	= 36 »		$S_i\,a_i$ = 16,20
Sillas 500 × 0,022			11,00
			$\Sigma a_i\,S_i$ = 87,14

$$T_o = 0{,}162 \cdot \frac{30 \times 15 \times 6}{87{,}14} = 5{,}03 \text{ seg.}$$

Ejercicio 25. Calcúlese el tiempo de reverberación del local anterior cuando estén ocupadas todas las localidades (absorción producida por un espectador, igual a 0,415).

Solución:

La nueva absorción será:

$$87{,}14 - 11 + 500 \times 0{,}415 = 283{,}14 \text{ ,,}$$

$$T'_o = 0{,}162 \frac{30 \times 15 \times 6}{283{,}14} = 1{,}55 \text{ seg.}$$

Ejercicio 26. Un estudio grande de Radiodifusión tiene dimensiones 30 × × 15 × 6 m. Las paredes, hasta de dos metros de altura, tienen un friso de celotex de 22 mm de espesor; el resto de las paredes y el techo están tapizados con tela. El suelo es de cemento recubierto de una gruesa alfombra. En esta sala se hace radioteatro y hay un escenario de dimensiones 9 × 4 m, con una cortina de terciopelo. En la sala hay quinientas butacas, fuertemente tapizadas. Calcular los tiempos de reverberación de este estudio con espectadores y sin ellos.

Solución:

Superficies		Absorciones
Techo	450 m²	$S_i\,a_i$ = 450 × 0,11 = 49,50
Suelo	450 »	» = 450 × 0,37 = 166,10
Pared friso	162 »	» = 162 × 0,62 = 102,00
» sin frisos...	342 »	» = 342 × 0,11 = 37,62
Escenario	36 »	» = 36 × 0,45 = 16,20
Butacas	500	» = 500 × 0,27 = 135,00
		$\Sigma a_i\,S_i$ 505,42

Sin espectadores:

$$T_o = 0{,}162 \cdot \frac{30 \times 15 \times 6}{505{,}42} = 0{,}865 \text{ seg.}$$

Con espectadores:

$$\Sigma a_i\,S_i = 505{,}42 - 135{,}00 + 207 - 557{,}42$$

$$T'_o = 0{,}162 \frac{30 \times 15 \times 6}{557{,}42} = 0{,}758 \text{ seg.}$$

Ejercicio 27. El local del ejercicio 22 está unido a otro de dimensiones 4 × 4 × 3 m, muy amortiguado por estar techo y paredes cubiertos de celotex BBB de 30 mm de espesor y el suelo con una alfombra de coeficiente de absorción

$a = 0,4$; la pared de separación de ambos locales tiene una pérdida de transmisión de 60 dB, y en ella se ha practicado una ventana de $1 \times 0,8$ m de dobles cristales y pérdida de transmisión de 30 dB. Se quiere producir en el segundo local una energía acústica justamente perceptible. ¿Qué potencia acústica debe tener un generador colocado en el local grande si su frecuencia son 500 c/s? ($v_1 = 334$ m/s).

Solución:

A 500 c/s la energía correspondiente al dintel de audibilidad está a —89 dB sobre 1 microwatio/cm², luego el flujo de energía que se debe producir en el lugar perturbado vale:

$$-89 = 10 \log_{10} \frac{w_2}{1} \;,,\; w_2 = 1,26 \cdot 10^{-8} \text{ ergios/sg/cm}^2.$$

La densidad media de energía correspondiente:

$$I = \frac{w_2}{v_1} = \frac{1 \cdot 26 \cdot 10^{-8}}{3,34 \cdot 10^4} = 0,37 \cdot 10^{-12} \text{ ergios/cm}^3.$$

La pared de separación tiene $3 \times 4 = 12$ m² de superficie, de los cuales

0,8 m² con pérdida de transmisión referente a 30 dB
11,2 m² con pérdida de transmisión referente a 60 dB

y como:

$$30 = 10 \log \frac{1}{\tau_1} \;,,\; \tau_1 = 10^{-3}$$

$$60 = 10 \log \frac{1}{\tau_2} \qquad \tau_2 = 10^{-6}$$

y, por tanto,

$$T = 11,2 \times 10^{-6} + 0,8 \cdot 10^{-3} \simeq 0,80 \times 10^{-3}$$

$$\Sigma a'_i S'_i = (3 \times 4 \times 4 + 16) \cdot 0,84 + 16 \times 0,4 = 60,16 \cdot 10^4 \text{ cm}^2$$

y

$$I_1 = \frac{I_2 \Sigma a_i S_i}{T} = \frac{0,37 \cdot 10^{-12} \cdot 60,16}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 2,75 \cdot 10^{-8} \text{ ergios/cm}^3$$

y como

$$I_1 = \frac{4E}{v_1 \Sigma a_i S_i} \;,,\; E = \frac{2,75 \cdot 10^{-8} \cdot 3,17 \cdot 10^4}{4} \; 505,4 \cdot 10^4 = 1200 \text{ ergios/sg.}$$

Ejercicio 28. El sonido producido por un foco sonoro puntual de frecuencia 250 c/s y potencia 0,1 watio se propaga en forma de ondas esféricas. ¿Cuál será la intensidad subjetiva apreciada por un observador que se encuentra a 5 m de dicho foco?

Solución:

El flujo de energía en microwatio/cm² en el sitio donde está colocado el observador, es:

$$\Phi = \frac{\text{Potencia foco}}{\text{Superficie esférica}} = \frac{10^5 \mu\text{w}}{4\pi \times 500^2} = 0,0318 \; \mu\text{w/cm}^2$$

que corresponde a

$$N = 10 \cdot \log_{10} \frac{0,0318}{1} = -14,96 \text{ dB}$$

respecto al nivel de 1 μ w.

Interpolando en las tablas:

$$\left.\begin{array}{l} -9 \text{ dB} \rightarrow 80 \text{ fonios} \\ -19 \text{ dB} \rightarrow 70 \text{ fonios} \end{array}\right\} \text{ luego en nuestro caso}$$

la intensidad subjetiva será 74,04 fonios.

EJERCICIO 29. Un amplificador de 40 w e impedancia de carga del tubo final de 6000 Ω, se utiliza con un altavoz de 20 w, otro de 10 w, y dos de 5 w.

Diseñar la red indicando los transformadores precisos y sus relaciones de transformación, si las impedancias de sus bobinas son 4 ,, 6 y 8 Ω.

Solución:

Si elegimos una distribución a 100 voltios, el transformador de salida será:

$$z_s = \text{Impedancia secundaria} = \frac{V^2}{w} = \frac{100^2}{40} = 250\ \Omega.$$

Transformador de salida del amplificador:

$$\left.\begin{array}{l}\text{Primario } 6000\\ \text{Secundario } 250\end{array}\right\} \text{relación transformación} = \sqrt{\frac{6000}{250}} = 4{,}9.$$

Impedancia que ofrece el altavoz de 20 w ,,

$$z_1 = \frac{100^2}{20} = 500\ \Omega.$$

Impedancia que ofrece el altavoz de 10 w:

$$z_2 = \frac{100^2}{10} = 1000\ \Omega.$$

Impedancia que ofrecen los altavoces de 5 w:

$$z_3 = \frac{100^2}{5} = 2000\ \Omega\ ,,$$

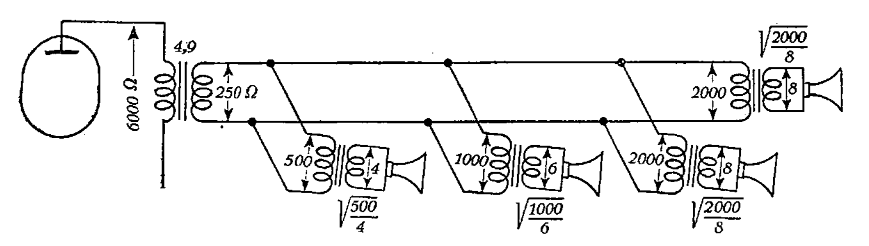
Relación transformación del transformador:

Primer altavoz: $r_1 = \sqrt{\frac{500}{4}}$

Segundo altavoz: $r_2 = \sqrt{\frac{1000}{6}}$

Tercer altavoz: $r_3 = \sqrt{\frac{2000}{8}}$

El esquema queda en la forma:



Comprobación:

Impedancia que ofrecen los 4 primarios de los altavoces:

$$z_s = \frac{1}{\frac{1}{500} + \frac{1}{1000} + \frac{1}{2000} + \frac{1}{2000}} = 250\ \Omega.$$

BIBLIOGRAFÍA

Física del sonido

Miller, C., *The Science of Musical Sounds*, Mac Millan.
Rayleigh, J. W. S., *Theory of Sound*, Mac Millan.
Jagër, *Fisica Teórica*, Labor, S. A.
Lamb, *Dynamical Theory of Sound*, Harnold.
Stewart, G. W., y Lindsay, R. B., *Acoustics*, D. van Nostrand.
Crescini, C., *Elettroacustica*, Ulrico Hoepli.

Sistemas mecánico-acústico-radiadores

Grandall, I., *Vibrating Systems and Sound*, D. van Nostrand.
Zobel, O. J., *Bell System. Tech. Jour.*, vol. II, 1923.
Johnson, K. S., *Transmission Circuits and Telephonic Communications*, D. Van Nostrand.
Olson, H. F., y Wolf, I., *Journ. Ac. Soc. Am.*, vol. I, 1931.
Stewart, G. W., y Lindsay, R. B., *Acoustic*, D. Van Nostrand.
Stewart, G. W., *Phys. Review.*, vol. 25, pág. 230, 1925.
Stenzel, H., *Zeits. Tech. Phys.*, vol. XII, pág. 621, 1931.

Micrófonos

von Braunmuhl, H. I., *El Zeits*, vol. LIV, pág. 1068, 1933.
Jones, W. C., *Bell System Tech. Journ.*, vol. X, pág. 46, 1934.
Brillantine, S., *P. I. R. E.*, vol. XVIII, pág. 1246, 1930.
Brillantine, S., *Journ. Ac. Soc. Am.*, vol. III, pág. 319, 1932.
Jones, W. C., y Giles, L. W., *Journ. Soc. Mot. Pic. Eng.*, vol. XVI, 1931.
Olson, H. F., *Journ. Soc. Mot. Pitc. Eng.*, vol. XVI, 1931.
Olson, H. F., *P. I. R. E.*, vol. XXI, pág. 655, 1933.
Olson, H. F., y Carlisle, R. W., *P. I. R. E.*, vol. XXII, pág. 1354, 1934.
von Braunmuhl, H. I., y Weherw, *Zeits Hochfr. Elek.*, diciembre, 1935.
Christensen y Pearson, *Spontaneous Resistence Fluctuations in carbon microphones other granular resistences*, *Bell System*, vol. XV, pág. 197. Abril, 1936.
Jones, W. C., *Bell System*, vol. X, pág. 16. Enero, 1931.
Olson, H. F., *P. I. R. E.*, vol. 21, pág. 655. Mayo, 1933.
Olson, H. F., y Carlisle, R. W., *P. I. R. E.*, vol. XXII, pág. 1354. Diciembre, 1934.
Wente, E. C., y Thuras, A. L., *Bell System Tech. Journ.*, vol. X, pág. 565. Octubre, 1931.

Altavoces

Köster, W., *Stahl u. Eisen*, vol. LII, pág. 849, 1933.
Wolff, I., y Malter, R., *Journ. Ac. Soc. Am.*, vol. II, pág. 201, 1933.
Olson, H. F., y Massa, *Applieds Acoustics*, P. Blakiston's.

MASSA, *Electronics*, vol. IX, pág. 20. Febrero, 1936.
HANNA, C. R. y SLEPIAN, J., *P. I. R. E.*, vol. XXII, pág. 33. Enero, 1934.
SEABERT, J. D., *P. I. R. E.*, vol. XXII, pág. 738. Junio, 1934.
CRESCINI, C., *Elettroacustica*, Ulrico Hoepli, 1939.
BALLANTINE, S., *P. I. R. E.*, vol. XXI, pág. 1399. Octubre, 1933.

REGISTRO DEL SONIDO

En discos

KELLOG, *Journ. Inst. El. Eng.*, vol. XLVI, pág. 1041, 1921.
KLUGE, *Hochfr. und Elek.*, vol. XL, pág. 55, 1932.
FORTESCUE, *Electroacoustic*, 1939.

Magnético

STILLE, *Elek. Tech. Zeits.*, vol. LI, pág. 444, 1930.
BEGUN, *Elek, Tech. Zeits.*, pág. 204, 1932.
WIRELERS WORLD, vol. XXXIV, pág. 8, 1934.
FORTESCUE, *Electroacoustic*, 1939.
HICKMANN, *Bell System Tech. Journ.*, vol. XVI, 1937.

Fotofónico

LÓPEZ, V., *Técnica del Cine Sonoro*, Afrodisio Aguado.
KREUZER, *Journ. Soc. Mot. Pic. Eng.*, vol. XXVI, pág. 671, 1931.
SANDVICK, *Trans. Soc. Mot. Pic. Eng.*, vol. XXII, pág. 83, 1934.

CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS DEL SONIDO

FLETCHER, H., *Journ. Acous. Soc. Am.* Octubre, 1934.
SNOW, W. B., *Bell System*, vol. X, pág. 616. Octubre, 1931.
SIVIAN, L., DUNN, H. K., y WHITE, S. D., *Journ. Acous. Soc. Am.*, vol. II, pág. 1330. Enero, 1931.
FLETCHER, *Electrical Engineer Handbook*, John Wiley & Sons.
VANDER, P., *P. I. R. E.*, vol. XVIII, pág. 221. Febrero, 1930.
FLETCHER y STEINBERG, *Journ. Ac. Soc. Am.*, vol. I, pág. 1, 1931.
KNUDSEN, *Architectural Acoustic.*
KNUDSEN, *Journ. Ac. Soc. Am.*, vol. I, pág. 56, 1931.
HELMHOLTZ, *On the Sensation of Tone.*
TROGER, *Phys. Zeits.*, vol. XXXI, pág. 26, 1930.
GÓMEZ-CORDOVÉS, *Revista de Telecomunicación*, núm. 1. Septiembre, 1945.

ACÚSTICA DE LOCALES

WATSON, *Acoustic of Building*, Jhon Wiley & Sons, 1925.
KNUDSEN, *Architectural Acoustic*, Jhon Wiley & Sons, 1932.
SABINE, P. E., *Acoustic and Architecture*, Mc Graw Hill, 1932.
SABINE, W. C., *Collected Papers in Acoustic*, Harvard University Press Cambridge Mass.
OLSON, *R. C. A. Rev.* Julio 1936.
MARCHESSI CAPPAI, *Acustica nell'Architettura*, Hoepli, 1935.
QUAGLIATA, *L'acustica nelle sale cinematografiche Riv. Architettura*, Treves, 1938.
OLSON y MASSA, *Applied Acoustic.* Blackiston.
Radio Engineering. Diciembre, 1935.
OLSON, *Journ. Ac. Soc. Am.*, vol. II, pág. 485, 1931.

MEDIDAS

BALLANTINE, S., *P. I. R. E.*, vol. XVI, pág. 1039. Diciembre, 1928.
HARRISON y FLANDERS, *Bell System*, vol. II, pág. 451. Julio, 1932.
OLSON y GOLDMANN, *Electronics*, vol. III, pág. 106. Septiembre, 1931.
SIVIAN, *Bell System*, vol. X, pág. 96. Enero, 1931.
MASSA, *Electronics*, vol. IX, pág. 18. Julio, 1936.
OLNEY, *P. I. R. E.*, vol. XIX, pág. 1113. Julio, 1931.

Índice alfabético

La Escuela del Radiotécnico

ENCICLOPEDIA PRÁCTICA
DE RADIOTECNIA APLICADA

Publicada bajo la dirección de JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS
Ingeniero de Telecomunicación

VOLÚMENES QUE CONSTITUYEN LA OBRA

I. **Fundamentos de Radioelectricidad,** por JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS, Ingeniero de Telecomunicación.

II. **Curso de Cine sonoro. Reproducción,** por EDUARDO GIL SANTIAGO, Licenciado en Ciencias Físicas, Ingeniero de Telecomunicación e Ingeniero de Servicio de la Western Electric Co. of Spain.

III. **Megafonía y Electroacústica,** por J. J. RAMIL MORAL, Ingeniero de Telecomunicación.

IV. **Medidas en alta y baja frecuencia,** por ESTEBAN BENABARRE, Jefe Técnico del Laboratorio de la Dirección General de Radiodifusión. *(Próxima publicación).*

V. **Alta frecuencia y Radiotecnia,** por JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS. *(Próxima publicación).*

VI. **Radiogoniometría,** por EMILIO FERNÁNDEZ CASADO, Ingeniero de Telecomunicación, y VALENTÍN QUINTAS CASTAÑS, Ingeniero de Telecomunicación. *(En prensa).*

VII. **La Radio en la Navegación aérea,** por MIGUEL SORIA DEL CAMPO, Ingeniero de Telecomunicación. *(En preparación).*

VIII. **La Radio en la Navegación marítima,** por EMILIO FERNÁNDEZ CASADO, Ingeniero de Telecomunicación, y VALENTÍN QUINTAS CASTAÑS, Ingeniero de Telecomunicación. *(En preparación).*

IX. **Receptores de Televisión,** por JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS. *(En preparación).*

X. **Reparación y ajuste de receptores,** por RAFAEL BURGUETE. *(En pr paración).*

XI. **Radioreceptores,** por JOSÉ DE PAULA PARDAL, Ingeniero de Telecomunicación. *(En preparación).*

XII. **El Oscilógrafo de Rayos catódicos y sus aplicaciones,** por EDUARDO GIL SANTIAGO, Licenciado en Ciencias Físicas, Ingeniero de Telecomunicación e Ingeniero de Servicio de la Western Electric Co. of Spain. *(En preparación).*

XIII. **Radiotransmisores. Proyecto y Construcción,** por JOAQUÍN SÁNCHEZ-CORDOVÉS y MIGUEL SORIA DEL CAMPO. *(En preparación).*